

KfK 5171
März 1993

Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern

A. Michel, R. Ruprecht, M. Harmening, W. Bacher
Institut für Mikrostrukturtechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Kernforschungszentrum Karlsruhe
Institut für Mikrostrukturtechnik

KfK 5171

**Abformung von Mikrostrukturen
auf prozessierten Wafern**

A. Michel *), R. Ruprecht, M. Harmening, W. Bacher

*) von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe genehmigte
Dissertation

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern

Zusammenfassung:

Zum Aufbau von Mikrosystemen ist die Integration von mechanischen Mikrostrukturen auf mikroelektronischen Schaltungen notwendig. Im Rahmen der Weiterentwicklung der LIGA-Technik wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem Mikrostrukturen aus Kunststoff oder Metall auf prozessierten Wafern, und damit auf mikroelektronischen Schaltungen, abgeformt werden können.

Bei diesem Verfahren werden die Mikrostrukturen mit einem Abformwerkzeug durch Prägen eines thermoplastischen Kunststoffes (Formstoff) erzeugt. Zunächst wird auf den mit einer Galvanikstartschicht versehenen prozessierten Wafer der Formstoff aufpolymerisiert. Der Formstoff wird oberhalb seiner Glasübergangstemperatur durch Eindrücken des Abformwerkzeuges im Vakuum strukturiert. Um die mikroelektronischen Schaltungen nicht durch den Kontakt mit dem Abformwerkzeug zu beschädigen, wird bei der Formgebung der Formstoff zwischen Abformwerkzeug und Wafer nicht vollständig verdrängt. Deshalb verbleibt zwischen Abformwerkzeug und prozessiertem Wafer bzw. der Galvanikstartschicht eine dünne, elektrisch isolierende Restschicht. Nach der Entformung wird die Restschicht durch reaktives Ionenätzen im Sauerstoffplasma entfernt. Im anschließenden Galvanoformungsprozeß werden auf der Galvanikstartschicht zwischen den abgeformten Strukturen aus Formstoff Mikrostrukturen aus Metall aufgalvanisiert. Danach werden die auf dem Wafer aufgalvanisierten Mikrostrukturen durch Auflösen des Formstoffs freigelegt.

Um bei der Kunststoff-Abformung die gegensätzlichen Forderungen nach einer sehr guten Haftung zum Wafer und einer sehr geringen Haftung zum Abformwerkzeug zu realisieren, wurde ein zweischichtiger Formstoff auf PMMA-Basis entwickelt. Dieser besteht aus einer nur wenigen Mikrometern dicken Haftschicht und dem eigentlichen Formstoff, der ein internes Trennmittel enthält.

Als Grundlagen für die Abformung von Mikrostrukturen durch Prägen wurden die Eigenschaften des Formstoffs und die Befüllung des Abformwerkzeuges mit Formstoff untersucht. Bei der Entformung muß die Reibung zwischen Abformwerkzeug und den Mikrostrukturen überwunden werden. Die hierzu notwendige Entformkraft wurde in Abhängigkeit des Trennmittels im Formstoff, der Prägekraft, der Entformtemperatur und der Entformgeschwindigkeit bestimmt.

Zur Erzeugung metallischer Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern wurde der Abtrag der Restschicht zwischen den abgeformten Mikrostrukturen im Sauerstoffplasma untersucht und die galvanische Abscheidung von Mikrostrukturen aus Nickel und Kupfer auf der im Sauerstoffplasma freigeätzten Galvanikstartschicht nachgewiesen.

Mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren zur Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern wurden erstmals Mikrostrukturen aus PMMA auf C-MOS-Schaltungen abgeformt und in Nickel galvanisiert. Durch die Abformung von Mikrostrukturen aus Formstoff auf prozessierten Wafern wurde gezeigt, daß die Funktion der mikroelektronischen Schaltungen durch die Abformung nicht beeinträchtigt wird. Die vor und nach der Abformung der Mikrostrukturen an typischen Testschaltungen gemessenen elektrischen Werte zeigten keine Beeinträchtigung der Mikroelektronik durch die Abformung der Mikrostrukturen aus Formstoff.

Zwischen den abgeformten Strukturen aus Formstoff wurden Mikrostrukturen aus Nickel auf einen prozessierten Wafer aufgalvanisiert. Weitere Untersuchungen zur Strukturierung der Galvanikstartschicht sowie die Funktionsprüfung der unter den Nickelstrukturen liegenden mikroelektronischen Schaltungen müssen jedoch noch durchgeführt werden.

Technique of Application of Mechanical Microstructures onto Microelectronic Circuits

Abstract

Mechanical microstructures must be integrated into microelectronic circuits to build up microsystems. Improving the LIGA technology a method was developed to mold microstructures on processed wafers and hence onto microelectronic circuits.

Applying this method microstructures are generated by molding of a thermoplastic polymer (mold material) using a molding tool. In a first step the mold material is applied by polymerisation onto the processed wafer coated with a metal film as a plating base. Above its glass transition temperature the mold material is patterned in vacuum by impression of the molding tool. In order to avoid damage of the microelectronic circuits by contact with the molding tool, the mold material is not displaced completely during molding. Thus, a thin electrically insulating residual layer of molding material is left between the molding tool and the plating base on the processed wafer. After demolding the microstructures the residual layer is removed by reactive ion etching in an oxygen plasma. In the subsequent electroplating process metal microstructures are electroplated on the plating base between the molded polymer microstructures. Then the metal microstructures are laid bare by dissolution of the mold material.

In order to satisfy the opposing requirements of very good adhesion to the wafer and very little adhesion to the molding tool in the process of plastic molding a two-layer PMMA base mold material was developed. It consists of an adhesion layer of only a few micrometers thickness and the actual mold material which contains an internal release agent.

The properties of the mold material as well as the filling of the molding tool with mold material - which provide the basis for microstructure molding through relief printing - were studied. In the process of demolding the friction between the molding tool and microstructures must be overcome. The demolding force required for this purpose was determined as a function of the fraction of release agent in the mold material, the impression force, the demolding temperature, and the rate of demolding.

In order to be able to generate metal microstructures on processed wafers removal of the residual layer between the molded microstructures was examined in an oxygen plasma and electrodeposition of microstructures made of nickel and copper onto the plating base uncovered by etching in the oxygen plasma was demonstrated.

Using the method developed within the framework of activities described here, PMMA made microstructures were molded for the first time on processed wafers (C-MOS circuits). It has been proven that, using the above described process, LIGA microstructures from PMMA can be molded onto CMOS integrated circuits without damaging the electronic device. The electrical values measured in typical test circuits prior to and after molding of the microstructures did not exhibit any impairment of microelectronics through molding of the microstructures made of mold material.

Microstructures made of nickel were electroplated onto a process wafer between the molded structures made of mold material. However, additional investigations into the shaping of the plating base and performance testing of the microelectronic circuits underneath the nickel structures have still to be done.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung und Zusammenfassung	1
2. Grundlagen der Mikrostruktur-Abformung	8
2.1 Anforderungen an den Formstoff	8
2.1.1 Haftschrift	9
2.1.2 Formstoff	11
2.1.3 Deformationsverhalten des Formstoffs	12
2.2 Fließverhalten der Formmasse beim Prägen	13
2.2.1 Verdrängung der Formmasse zwischen Formeinsatz und Substrat	16
2.2.2 Befüllung des Formeinsatzes	17
2.3 Modell zur Beschreibung des Einflusses der Prägekraft und der Entformtemperatur auf die Entformkraft	18
2.4 Abformverfahren	22
3. Aufbau und Durchführung der Versuche	25
3.1 Untersuchung der Haftschrift	25
3.1.1 Zusammensetzung der Haftschrift	25
3.1.2 Bestimmung der Zugfestigkeit der Verbindung Haftschrift - Titanoxid	26
3.2 Untersuchung des Formstoffs	27
3.2.1 Bestimmung des Speichermoduls und der Glasübergangstemperatur	27
3.2.2 Bestimmung der dynamischen Viskosität	28
3.2.3 Bestimmung des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten	30
3.2.4 Bestimmung der Zugeigenschaften	31
3.3 Abformung von Mikrostrukturen	32
3.3.1 Laboranlage zur Abformung von Mikrostrukturen	32
3.3.2 Formeinsätze zur Abformung von Mikrostrukturen	34
3.3.3 Formgebung durch Prägen	36
3.3.4 Entformung der Mikrostrukturen	38

4. Experimentelle Ergebnisse und Diskussion	39
4.1 Haftschrift	39
4.1.1 Haftschriften für Titanoxid	40
4.1.2 Haftschriften für Silizium-Wafer und Stahlsubstrate	44
4.2 Materialeigenschaften des Formstoffs	46
4.2.1 Speichermodul und Übergangstemperaturen	46
4.2.2 Dynamische Viskosität	48
4.2.3 Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Formstoffs	50
4.2.4 Eigenschaften des Formstoffs bei Zugbeanspruchung	51
Einfluß der Temperatur auf die Werkstoffeigenschaften	51
Einfluß des Trennmittels auf die Werkstoffeigenschaften	54
Einfluß des Initiators und des Aktivators auf die Werkstoffeigenschaften	57
4.3 Abformung von Mikrostrukturen	58
4.3.1 Befüllung des Formeinsatzes	58
4.3.2 Entformung der Mikrostrukturen	60
Einfluß des Trennmittels im Formstoff auf die Entformkraft	63
Einfluß der Entformgeschwindigkeit auf die Entformkraft	64
Einfluß der Prägekraft auf die Entformkraft	64
Einfluß der Entformtemperatur auf die Entformkraft	66
Einfluß der thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Substrats auf die Entformkraft	67
Optimierte Abformparameter	68
4.4 Herstellung metallischer Mikrostrukturen	70
4.4.1 Vertikaler Ätzabtrag an Mikrostrukturen	70
4.4.2 Lateraler Ätzabtrag an Mikrostrukturen	71
4.5 Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern	72
5. Ausblick	74
Literaturverzeichnis	79
Anhang	83

1. Einleitung und Zusammenfassung

Wie bei der Entwicklung der Mikroelektronik, die durch eine fortwährende Miniaturisierung der integrierten Schaltungen immer leistungsfähiger wurde, zeichnet sich auch bei der Herstellung mechanischer Bauteile ein Trend zu immer kleineren Einheiten ab. Durch die Miniaturisierung von Sensoren, Aktoren und die Integration zu Systemen kann eine erhebliche Leistungssteigerung und eine größere Zuverlässigkeit sowie eine kostengünstige Massenfertigung erreicht werden. Daneben ergeben sich für immer kleiner werdende Systeme ganz neue Anwendungsmöglichkeiten. Dies gilt insbesondere für die Mikrosysteme /1-5/, die durch die Verbindung von Mikromechanik und Mikroelektronik realisiert werden sollen.

Für den Aufbau von Mikrosystemen müssen Komponenten unterschiedlicher Technologien, beispielsweise Sensoren und Aktoren sowie Auswerte- und Steuer-elektronik, auf einem Substrat integriert werden. Die Mikrosensoren oder Mikro-sensorarrays erfassen physikalische Größen, wie etwa Temperatur, Druck oder Beschleunigung, die durch die Mikroelektronik in elektrische Signale umgewandelt und ausgewertet werden. Über die Ausgangssignale können die ebenfalls im Mikrosystem integrierten Aktoren, wie etwa Mikroventile, angesteuert werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Sensoren und Aktoren müssen bei den mikro-mechanischen Bauteilen der Mikrosysteme nur sehr kleine Massen bewegt werden. Dadurch kann das ganze System schneller auf Änderungen von physi-kalischen Größen reagieren, benötigt eine deutlich geringere Antriebsleistung und hat einen wesentlich geringeren Einfluß auf die zu regelnde Größe. Die auf das Mikrosystem einwirkenden Größen können vor Ort erfaßt und geregelt werden.

Als Basistechnologie zur Herstellung mikromechanischer Bauteile wurde am Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) im Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) das LIGA-Verfahren entwickelt /5-7/. Es wird seit 1989 von der Firma MicroParts GmbH kommerziell genutzt. Beim LIGA-Verfahren erfolgt die primäre Strukturierung durch Röntgentiefen-Lithographie mit Synchrotronstrahlung. In einem zweiten Fertigungsschritt werden die Mikrostrukturen mit Hilfe der Mikro-Galvanoformung in komplementäre Strukturen aus Metall überführt. Diese Metallstrukturen können durch Mikro-Abformung von Kunststoffen und anschließende Galvanoformung in großer Zahl kopiert werden. Beim LIGA-Verfahren lassen sich Mikrostrukturen mit planparallelen, glatten Wänden ($R_a \leq 40 \text{ nm}$) /7, 8/ mit einer Höhe von mehreren hundert Mikrometern durch den Einsatz von Synchrotronstrahlung erzeugen. Dabei liegen die kleinsten lateralen

Abmessungen im Mikrometerbereich. Während mechanische Mikrostrukturen, die mit den aus der Silizium-Mikromechanik bekannten Verfahren strukturiert werden, fast ausnahmslos an das Basismaterial Silizium und aufgrund des Kristallgitters an bestimmte Geometrien gebunden sind /2, 3/, können beim LIGA-Verfahren Mikrostrukturen aus Metall, Kunststoff oder Keramik in jeder beliebigen lateralen Geometrie und auch in der Höhe gestuft und damit dreidimensional hergestellt werden /6, 9/.

Bisher wurden mit dem LIGA-Verfahren sowohl fest mit dem Substrat verbundene als auch freitragende und bewegliche Mikrostrukturen hergestellt /1, 10-16/. Für die im LIGA-Verfahren erzeugten mikromechanischen Bauteile gibt es bereits ein breites Feld von Anwendungsmöglichkeiten /5, 6/ im Bereich der allgemeinen Meß- und Regeltechnik, im Informations- und Verkehrswesen sowie in der Medizintechnik.

Die Herstellung von Mikrostrukturen erfolgt in der Forschung und bei geringen Stückzahlen überwiegend durch Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung und bei der Serienproduktion durch Abformung. Hierbei wird die vergleichsweise aufwendige und teure Röntgentiefenlithographie nur zur Erzeugung der Primärstruktur eingesetzt. Anschließend wird durch Galvanoformung ein Abformwerkzeug aus Metall (Formeinsatz) hergestellt /17, 18/. Mit dem Formeinsatz lassen sich dann durch Spritzguß, Reaktionsguß oder Prägen¹⁾ eine große Zahl gleicher Mikrostrukturen aus Kunststoff abformen /6/.

Zum Aufbau von Mikrosystemen muß die Integration von Mikrostrukturen auf mikroelektronischen Schaltungen ermöglicht werden. Um hierbei eine hohe Funktionsdichte zu erreichen, sollen die Mikrostrukturen direkt über den mikroelektronischen Schaltungen erzeugt werden. Da die harte Synchrotronstrahlung bei der Röntgentiefenlithographie die mikroelektronischen Schaltungen schädigt, sollen die Mikrostrukturen über den mikroelektronischen Schaltungen durch Abformung erzeugt werden /16/. Dabei dürfen die mikroelektronischen Schaltungen durch den Abformprozeß, insbesondere durch die hierbei auftretenden Zug- und Druckspannungen nicht beschädigt oder verstimmt werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, das hierzu notwendige Verfahren zu entwickeln. Hierbei konnte auf den Ergebnissen der bisher am IMT entwickelten Abformverfahren aufgebaut werden. Bei diesen Verfahren wurden die Form-

1) Als Prägen wird nach DIN 8583 das Umformen durch Eindringen des Formeinsatzes in den Kunststoff bezeichnet. Bei der Abformung von Mikrostrukturen nach dem LIGA-Verfahren wird der Formeinsatz bei erhöhter Temperatur im Vakuum in den Kunststoff eingedrückt.

nester des Formeinsatzes über einen Anguß²⁾ im Vakuum mit Reaktionsgießharz gefüllt und das Reaktionsgießharz im Formeinsatz ausgehärtet /17, 18/. Die zur Entformung der Mikrostrukturen notwendige Entformkraft wurde über makroskopische Hinterschneidungen auf das Substrat übertragen.

Der bei der Polymerisation auftretende Reaktionsschwund wurde bei beiden Abformverfahren durch einen hohen Druck des Reaktionsgießharzes kompensiert. Die Aushärtung des Reaktionsgießharzes im Formeinsatz bedingt zudem relativ lange Zykluszeiten. Außerdem muß bei der Abformung mit Reaktionsgießharzen eine hohe Schließkraft zur Abdichtung zwischen Formeinsatz und Substrat aufgebracht werden. Um diese Nachteile zu umgehen, wurden für die Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern die Funktionen „Formeinsatz befüllen“ und „Aushärten des Reaktionsgießharzes“ getrennt und die Mikrostrukturen durch Prägen eines vorgefertigten Formstoffes³⁾ erzeugt.

Als Formstoff wurde unvernetztes Polymethylmethacrylat (PMMA) eingesetzt. Es zeichnet sich durch gute Verarbeitungseigenschaften sowie eine hohe Festigkeit im ausgehärteten Zustand aus und kann selektiv gegenüber dem Formeinsatz aus Nickel und vielen anderen Materialien aufgelöst werden /17, 20/. Außerdem lassen sich die Materialeigenschaften durch Variation der Polymerisationsbedingungen, sowie durch die Zugabe von internen Trennmitteln oder Füllstoffen, den jeweiligen Anforderungen anpassen.

Bei höheren Temperaturen befindet sich der Formstoff im viskoelastischen Zustand, läßt sich plastisch umformen und wird dann als Formmasse bezeichnet. Beim Prägen liegt der Viskositätswert der Formmasse um mehrere Größenordnungen über dem des Reaktionsgießharzes, das bisher am IMT für die Mikrostruktur-Abformung eingesetzt wurde.

Als Voraussetzung für die Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten, d. h. mit mikroelektronischen Schaltungen versehenen Wafern, muß deshalb beim Prägen das Fließverhalten der Formmasse untersucht und eine vollständige Befüllung des Formeinsatzes erreicht werden. Um beim Prägen die mikrostrukturierte Oberfläche des Wafers nicht durch den Formeinsatz zu beschädigen, darf die Formmasse zwischen Wafer und Formeinsatz nicht vollständig verdrängt werden, so daß eine dünne Restschicht verbleibt.

- 2) Als Anguß wird der Hohlraum zwischen Formeinsatz und Substrat bezeichnet, durch den das Reaktionsgießharz in den Formeinsatz fließt.
- 3) Als Formstoff wird im folgenden Text ein thermoplastischer Kunststoff bezeichnet, der beim Spritzguß oder zum Prägen eingesetzt wird.

Für die Entformung ist eine gute Haftung der Mikrostrukturen auf der Waferoberfläche⁴⁾ erforderlich. Da die mikrostrukturierte Oberfläche des Formeinsatzes wesentlich größer ist als die dem Formeinsatz gegenüberliegende Waferoberfläche, muß gleichzeitig eine möglichst geringe Haftung zwischen Formeinsatz und den Mikrostrukturen erreicht werden.

Durch die zur Überwindung der Haftung zwischen Formeinsatz und den Mikrostrukturen notwendigen Entformkraft können die mikroelektronischen Schaltungen geschädigt werden. Außerdem können die Mikrostrukturen plastisch verformt oder von der Oberfläche des prozessierten Wafers gerissen werden. Deshalb wird bei der Entformung eine möglichst geringe Entformkraft angestrebt. Um die Mikrostrukturen bei der Entformung nicht zu überdehnen, müssen die Werkstoffkennwerte des Formstoffes im interessierenden Temperaturbereich genau bestimmt werden⁵⁾.

Um zwischen den abgeformten Strukturen aus Formstoff fehlerfreie Mikrostrukturen aus Metall aufzugalvanisieren, muß die isolierende Restschicht zwischen den Mikrostrukturen aus Formstoff vollständig von der Galvanikstartschicht entfernt werden. Dabei dürfen die abgeformten Mikrostrukturen nicht beschädigt werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern. Hierfür mußte ein zu den Prozeßtechniken der Halbleiterfertigung kompatibles Abformverfahren entwickelt werden. Als Grundlage hierfür mußte zunächst das Fließverhalten der hochviskosen Formmasse und die Befüllung von Formeinsätzen mit minimalen lateralen Formnestabmessungen bis hinab zu 2 µm beim Prägen untersucht werden. Um Mikrostrukturen mit lateralen Abmessungen im µm-Bereich entformen zu können und die mikroelektronischen Schaltungen durch die Abformung nicht unzulässig zu belasten, war die Abhängigkeit der Entformkraft von den Prozeßparametern beim Prägen zu untersuchen und die Abformung im Hinblick auf eine minimale Entformkraft zu optimieren. Hierzu mußten auch verschiedene Werkstoffeigenschaften des Formstoffes bestimmt werden. Aufbauend auf diesen Untersuchungen, den bisherigen Abformverfahren mit Reaktionsgießharzen auf der Basis von PMMA und ersten Ergebnissen beim Prägen, war im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren zur

- 4) Sollen auf dem prozessierten Wafer Mikrostrukturen aus Metall aufgalvanisiert werden, so muß die Waferoberfläche vor der Abformung mit einer als Galvanikstartschicht dienenden Metallisierungsschicht versehen werden.
- 5) Weil der Formstoff aus einem Gießharz mit einem internen Trennmittel hergestellt wurde und die Eigenschaften des Formstoffes von der Verarbeitung des Gießharzes abhängen, konnten keine allgemeinen Literaturangaben herangezogen werden.

Abformung von galvanisierbaren Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern zu entwickeln.

Das Verfahren basiert auf einer Strukturierung des Formstoffes durch Prägen und unterscheidet sich dadurch von den bisher am IMT eingesetzten Abformverfahren mit Reaktionsgießharzen. Im ersten Schritt wird auf den mit einer Galvanikstartschicht versehenen Wafer der Formstoff aufpolymerisiert. Der beschichtete Wafer wird auf eine Temperatur aufgeheizt, die oberhalb der Glasübergangstemperatur des Formstoffes liegt. Die Strukturierung der Formmasse erfolgt durch Eindrücken des Formeinsatzes im Vakuum. Um die mikroelektronischen Schaltungen nicht durch den Kontakt mit dem Formeinsatz zu beschädigen, wird bei der Formgebung die Formmasse zwischen Formeinsatz und Wafer nicht vollständig verdrängt. Deshalb verbleibt zwischen Formeinsatz und prozessiertem Wafer bzw. zwischen der Galvanikstartschicht und den Mikrostrukturen eine dünne, elektrisch isolierende Restschicht. Nach der Entformung wird die Restschicht durch reaktives Ionenätzen (RIE) im Sauerstoffplasma entfernt. In einem anschließenden Galvanoformungsschritt werden zwischen den abgeformten Strukturen aus Formstoff Mikrostrukturen aus Metall aufgalvanisiert. Zum Schluß werden die auf dem Wafer aufgalvanisierten Mikrostrukturen durch selektives Auflösen des Formstoffes freigelegt.

Zusammenfassung: Um beim Formstoff die gegensätzlichen Forderungen nach einerseits einer sehr guten Haftung zum Wafer und andererseits einer sehr geringen Haftung zum Formeinsatz zu realisieren, wurde ein Schichtverbund entwickelt. Zunächst wird eine nur wenige Mikrometer dicke Haftschicht aus PMMA auf den Wafer aufpolymerisiert. Diese Haftschicht enthält einen internen Haftvermittler, der für eine gute Haftung auf der Waferoberfläche sorgt. Nach der Aushärtung der Haftschicht wird der für die Entformung optimierte Formstoff, ebenfalls aus PMMA, aufpolymerisiert. Dieser Formstoff enthält ein internes Trennmittel. Bei dem für die Abformung von Mikrostrukturen optimierten Trennmittelanteil im Formstoff wird die Reaktion zwischen Haftschicht und Formstoff nicht behindert, so daß im Formstoff eine sehr stabile Verbindung entsteht.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen des Formstoffes zeigen, daß der bei Raumtemperatur spröde Formstoff oberhalb von 80 °C zu erweichen beginnt und bei der Glasübergangstemperatur (112 °C) in den viskoelastischen Zustand übergeht. Der Viskositätswert der Formmasse nimmt im Temperaturintervall von 115 °C bis 165 °C um ca. 2 Größenordnungen ab, liegt aber bei der Prägetemperatur (165 °C) immer noch rund vier Größenordnungen

über dem Viskositätswert der Reaktionsgießharze, die bisher am IMT bei der Abformung eingesetzt wurden. Trotzdem konnte experimentell gezeigt werden, daß auch beim Prägen Formeinsätze, deren Formnester eine Breite von nur $2\ \mu\text{m}$ und eine Höhe von $100\ \mu\text{m}$ aufweisen, vollständig mit Formmasse befüllt werden. Durch die Prägekraft, mit der der Formeinsatz beim Prägen in die Formmasse gedrückt wird, wird der Druck zur Befüllung des Formeinsatzes erzeugt und die Formmasse zwischen Formeinsatz und Wafer verdrängt. Die zwischen Formeinsatz und Wafer verbleibende Restschicht hängt von der Prägekraft und Prägezeit sowie der Viskosität der Formmasse ab. Durch eine geeignete Wahl der Abformparameter wird die Formmasse zwischen Formeinsatz und Wafer nicht vollständig verdrängt, so daß die mikroelektronischen Schaltungen auf dem Wafer durch den Formeinsatz nicht mechanisch beschädigt werden können.

Nach dem Prägen wird die viskoelastische Formmasse durch Abkühlung unter die Erweichungstemperatur in den hartelastischen Glaszustand überführt und die Mikrostrukturen können entformt werden. Die zur Entformung der Mikrostrukturen notwendige Entformkraft hängt von der Mikrostrukturgeometrie, der Entformtemperatur, den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Substrat, Formeinsatz und Formstoff und vor allem von der Führung des gesamten Abformprozesses ab. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Modell theoretisch erarbeitet und anhand experimenteller Ergebnisse verifiziert, mit dem der Einfluß der Prägekraft und der Entformtemperatur auf die Entformkraft beschrieben wird (vgl. Kap. 2.3). Bei der Formgebung wird durch die Prägekraft in der Formmasse ein Druck erzeugt, der in den Mikrostrukturen zu einer Druckspannung führt. Durch die Druckspannung werden die Wände der Mikrostrukturen gegen die sie umgebenden Formeinsatzwände gedrückt. Deshalb führt eine Verringerung der Prägekraft zu einer Verringerung der Druckspannung in den Mikrostrukturen und somit zu einer niedrigeren Entformkraft.

Bei der Abkühlung ziehen sich vom Formeinsatz umgebene Mikrostrukturen aus Formstoff, z. B. Säulen aus PMMA, aufgrund des größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten stärker zusammen als der sie umgebende Formeinsatz aus Nickel. Dadurch nimmt mit abnehmender Temperatur die Kraft ab, mit der die Mikrostrukturen gegen die Wände des Formeinsatzes gedrückt werden. Dies führt bei abnehmender Entformtemperatur zu einer Verringerung der Entformkraft. Sowohl der Einfluß der Prägekraft als auch der Entformtemperatur auf die Entformkraft wurden bei der Abformung von Wabenprismen-Mikrostrukturen experimentell bestätigt. Unter optimierten Abformbedingungen ließen sich auch sehr feine Mikrostrukturen mit einer Breite von nur $2\ \mu\text{m}$ und einer Höhe von $100\ \mu\text{m}$ ohne plastische Verformung entformen.

Die Entformbarkeit hängt außer von den durch den Abformprozeß in den Mikrostrukturen erzeugten Spannungen von den Werkstoffeigenschaften des Formstoffes ab. Die hierzu durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, daß bei der Abkühlung der Elastizitätsmodul und die Festigkeit des Formstoffes unterhalb der Glasübergangstemperatur sehr stark zunehmen. Oberhalb der Versprödungstemperatur von ca. 65 °C zeigt der Formstoff ein duktiles Deformationsverhalten mit deutlichen Einschnürungstendenzen. Die Bruchdehnung nimmt oberhalb der Versprödungstemperatur mit zunehmender Temperatur schnell zu und kann mehr als eine Größenordnung über den Werten bei Raumtemperatur liegen. Aus diesem Grund können die Mikrostrukturen oberhalb der Versprödungstemperatur beim Entformen überdehnt werden. Die Überdehnung hängt von der Entformtemperatur, der Entformkraft und der Mikrostrukturgeometrie ab. Unterhalb der Versprödungstemperatur zeigt der Formstoff ein sehr ausgeprägtes Sprödbbruchverhalten. Bei den unterhalb der Versprödungstemperatur des Formstoffes entformten Mikrostrukturen waren mit dem Rasterelektronenmikroskop keine plastischen Deformationen zu erkennen.

Nach der Entformung ist über der Galvanikstartschicht zwischen den Mikrostrukturen eine Restschicht aus Formstoff vorhanden. Die Restschicht wird durch reaktives Ionenätzen im Sauerstoffplasma entfernt. Bei einer geeigneten Wahl der Ätzparameter wird ein stark anisotropes Ätzen erreicht. Dadurch werden die senkrechten Mikrostrukturwände nur geringfügig angegriffen. Auf der vollständig freigelegten Galvanikstartschicht wurden durch Galvanoformung sowohl Kupfer- als auch Nickelmikrostrukturen fehlerfrei abgeschieden.

Mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren zur Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern konnten erstmals Mikrostrukturen aus PMMA auf C-MOS-Schaltungen abgeformt und in Nickel galvanisiert werden. Durch die Abformung von Mikrostrukturen aus Formstoff auf prozessierten Wafern wurde gezeigt, daß die Funktion der mikroelektronischen Schaltungen durch die Abformung nicht beeinträchtigt wird. Die vor und nach der Abformung der Mikrostrukturen an typischen Testschaltungen gemessenen elektrischen Werte zeigten keine Beeinträchtigung der Mikroelektronik durch die Abformung der Mikrostrukturen aus Formstoff.

2. Grundlagen der Mikrostruktur-Abformung

Zum Aufbau von Mikrosystemen wird die Integration von mikromechanischen Sensoren und Aktoren auf mikroelektronischen Schaltungen angestrebt. Hierzu wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Verfahren entwickelt, mit dem sich Mikrostrukturen aus Kunststoff direkt auf mikroelektronischen Schaltungen von prozessierten Wafer abformen lassen. Bei diesem Verfahren wird ein thermoplastischer Kunststoff (Formstoff) mit einem Formeinsatz durch Prägen strukturiert. Das Prägen erfolgt im Vakuum bei einer Temperatur, die oberhalb der Glasübergangstemperatur des Formstoffes liegt.

Als Grundlagen für die Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern werden in den folgenden Kapiteln die Anforderungen an den Formstoff und dessen Deformationsverhalten beschrieben. Anschließend werden zwei Modelle vorgestellt, mit denen beim Prägen die Befüllung des Formeinsatzes mit Formmasse und beim Entformen die Einflüsse der Prägekraft und der Entformtemperatur auf die zur Entformung der Mikrostrukturen notwendigen Entformkraft beschrieben wird.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur Abformung von Mikrostrukturen aus Kunststoff oder Metall auf prozessierten Wafern wird am Schluß dieses Kapitels vorgestellt.

2.1 Anforderungen an den Formstoff

Beim Entformen muß die Haftung/Reibung zwischen Formeinsatz und den Mikrostrukturen aus Formstoff überwunden werden. Um die Haftung des Formstoffes gegenüber der Metalloberfläche des Formeinsatzes herabzusetzen, kann dem Formstoff vor der Polymerisation ein internes Trennmittel zugesetzt werden. Andererseits muß die zum Entformen der Mikrostrukturen notwendige Entformkraft von dem prozessierten Wafer auf die Mikrostrukturen übertragen werden. Im Gegensatz zu den bisher am IMT eingesetzten Abformverfahren /17, 18/ besteht zwischen den abgeformten Mikrostrukturen und dem prozessierten Wafer keine makroskopische, formschlüssige Verbindung. Deshalb muß zwischen den Mikrostrukturen und dem prozessierten Wafer eine gute Haftung erreicht werden, zumal die vom Formeinsatz bedeckte Oberfläche der Mikrostrukturen auf jeden Fall größer als die gegenüberliegende Oberfläche zwischen den Mikrostrukturen und dem prozessierten Wafer ist. Durch das Trennmittel im Formstoff wird die Haftung zwischen Wafer und den Mikrostrukturen so stark verringert, daß sich die Mikrostrukturen bereits bei der Entformung vom prozessierten

Wafer lösen. Um sowohl eine geringe Haftung zwischen Formeinsatz und Formstoff und gleichzeitig eine gute Haftung zwischen Formstoff und prozessiertem Wafer zu erreichen, wurde ein zweischichtiger Formstoff entwickelt und damit eine Funktionentrennung erreicht.

Der Formstoff besteht aus einer wenige Mikrometer dicken Haftschrift auf dem prozessierten Wafer, auf die der eigentliche Formstoff, der ein internes Trennmittel enthält, aufpolymerisiert wird. Da sowohl Haftschrift als auch Formstoff aus Polymethylmethacrylat (PMMA) bestehen, wird trotz des Trennmittels im Formstoff eine stoffschlüssige Verbindung beider Schichten erreicht /18/.

2.1.1 Haftschrift

Die Haftschrift besteht aus PMMA mit einem internen Haftvermittler. Durch die Verwendung von Haftvermittlern kann die Haftung von Polymeren auf einer Substratoberfläche verbessert werden. Die Haftvermittler können entweder direkt auf die Substratoberfläche aufgetragen oder dem Polymer vor der Polymerisation zugesetzt werden. Die Verbesserung der Haftung durch externe Haftvermittler beruht sehr oft auf einer „Reinigung“ der Substratoberfläche, bei der z. B. Spuren von H_2O chemisch gebunden werden /20/. Bei den internen Haftvermittlern wird die Verbesserung der Haftung entweder durch intermolekulare Kräfte oder aber durch den Aufbau einer chemischen Verbindung zum Substrat erzielt. Hierfür muß der Haftvermittler einen Molekülaufbau aufweisen, der sowohl eine Reaktion mit der Substratoberfläche als auch mit dem Polymer ermöglicht. Aus diesem Grund werden für unterschiedliche Substratmaterialien unterschiedliche Haftvermittler eingesetzt. Die in den verschiedenen Haftschriften eingesetzten Haftvermittler (siehe Kap. 3.1.1) besitzen alle als reaktionsfähige Endgruppe eine Methacryl-Gruppe, über die bei der Polymerisation eine chemische Bindung zu den Makromolekülen des PMMA erfolgen kann. Einige Haftvermittler sowie deren Haftungsmechanismen werden in /7, 20/ beschrieben.

Neben der Wahl eines geeigneten Haftvermittlers hängt die Festigkeit der Haftschrift auf dem Substrat auch von dem Druck und der Temperatur bei der Polymerisation sowie von der Zeit nach dem Beginn der Polymerisation ab. Wie in Abbildung 2.1 schematisch gezeigt wird, nimmt zunächst die Festigkeit bis zur vollständigen Aushärtung der Haftschrift zu. Anschließend kann die Festigkeit durch Alterung, z. B. in feuchter Atmosphäre, wieder abnehmen.

Bei der Polymerisation nehmen die Konzentration und die Diffusionsgeschwindigkeit des Monomers mit zunehmender Zeit ab. Dadurch kann, besonders bei

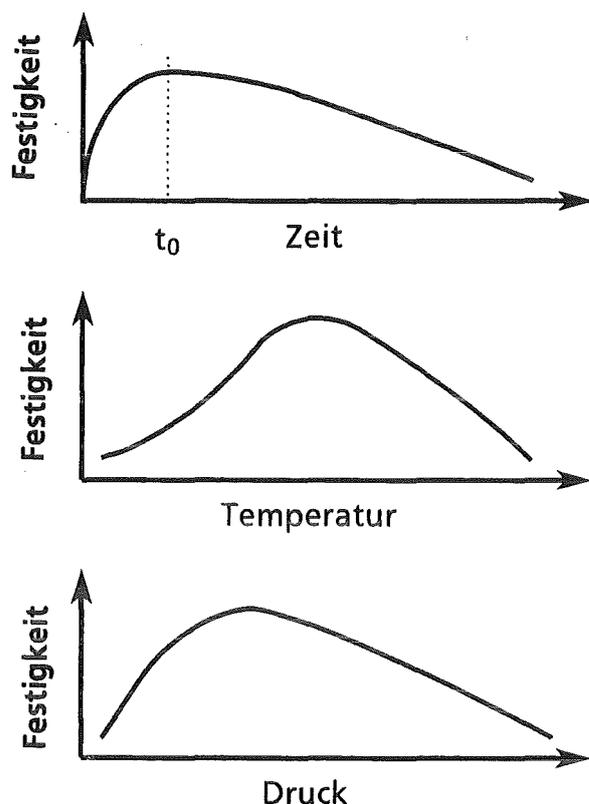


Abb. 2.1: Festigkeit einer Haftschrift auf einem Substrat /20/. Nach einer Zeit t_0 (nach dem Beginn der Polymerisation) wird die maximale Festigkeit erreicht. Die unteren Kurven zeigen (zur Zeit t_0) den Einfluß der Temperatur und des Druckes während der Polymerisation auf die Festigkeit.

kalthärtenden Systemen, ein Zustand erreicht werden, bei dem die Reaktion trotz Vorhandenseins von Monomer zum Stillstand kommt /20/. Das im Polymer vorhandene Restmonomer führt zu einer verringerten Festigkeit gegenüber einem voll ausgehärteten Polymer. Durch eine Temperaturerhöhung kann die Diffusionsgeschwindigkeit der Monomere erhöht und dadurch die Polymerisation fortgeführt und die Restmonomerkonzentration verringert werden. Aus diesem Grund kann bei kalthärtenden Systemen die Festigkeit mit ansteigender Temperatur zunächst zunehmen. Durch Tempern der Haftschrift können nicht nur der Restmonomeranteil gesenkt, sondern auch die in der Schicht vorhandenen Eigenspannungen durch Relaxation verringert werden. Durch die bei höheren Temperaturen einsetzende Thermoplastizität bzw. durch die beginnende chemische oder thermische Zersetzung nimmt die Festigkeit bei einer weiteren Temperaturerhöhung wieder ab.

Die Festigkeit der Haftschrift auf dem Substrat hängt auch von dem Druck ab, mit dem das Gießharz während der Polymerisation zwischen Substrat und einer Abdeckplatte verdrängt wird. Mit zunehmendem Druck nimmt die Schichtdicke

des zunächst niederviskosen Gießharzes ab und die Festigkeit aufgrund der zunehmend wirksamen Oberfläche und Adhäsionsenergie zu /20/. Sobald die Haftschichtdicke kleiner als die Rauigkeit des Substrates wird, führen Diskontinuitäten (Mikrorisse) in der Haftschicht zu einer Verringerung der Festigkeit.

2.1.2 Formstoff

Für die Abformung von Mikrostrukturen eignen sich besonders Gießharzsysteme auf Methacrylatbasis /17-19/. Im ausgehärteten Zustand besitzt PMMA eine gute Formstabilität. Außerdem gibt PMMA bei der Galvanoformung in z. B. Nickel-sulfamat-, Kupferfluorborat- und Kupfersulfatelektrolyten, sowie in cyanidischen und sulfidischen Goldelektrolyten keine störenden Verunreinigungen an den jeweiligen Elektrolyten ab und kann deshalb auch in der Mikrogalvanoformung eingesetzt werden. Die Polymerisation von Methacrylat-Gießharz zu Polymethylmethacrylat (PMMA) wird in der Literatur ausführlich beschrieben /17-19/.

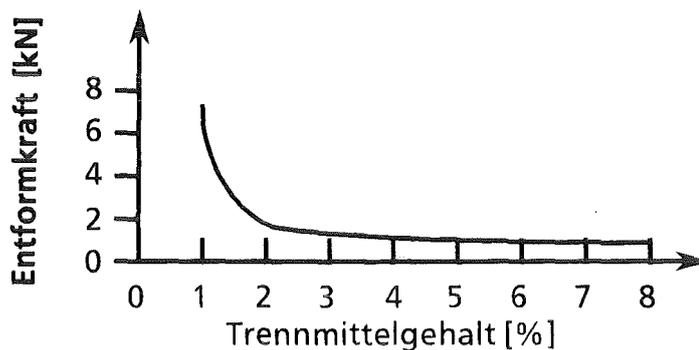


Abb. 2.2: Einfluß des Trennmittelanteils im Reaktionsgießharz auf die Entformkraft von im Reaktionsguß hergestellten Mikrostrukturen /17/.

Wie Abbildung 2.2 zeigt, wird bei der Abformung mit Reaktionsgießharzen auf Methacrylatbasis durch die Zugabe eines internen Trennmittels die zur Entformung der Mikrostrukturen notwendige Entformkraft reduziert. Für die Abformung von Mikrostrukturen mit sehr geringen lateralen Abmessungen ist beim Reaktionsguß ein Mindestanteil an Trennmittel für eine fehlerfreie Entformung notwendig /17/. In den beschriebenen Versuchen wurde ein internes Trennmittel verwendet. Mit steigendem Trennmittelgehalt nimmt einerseits die Entformkraft ab, andererseits führt ein zu hoher Trennmittelanteil in den Mikrostrukturen zu Poren. Außerdem nehmen mit steigendem Trennmittelgehalt die Festigkeit und der Speichermodul des Formstoffes ab.

2.1.3 Deformationsverhalten des Formstoffes

Bei der Abformung von Mikrostrukturen werden bereits bei der Formgebung und durch die Abkühlung Spannungen im Formstoff hervorgerufen. Bei dem zur Abformung eingesetzten Formstoff handelt es sich um einen amorphen Werkstoff, der beim Anlegen von Zug- bzw. Druckspannungen ein zeitabhängiges Verformungsverhalten aufweist. Das eindimensionale Verformungsverhalten wird durch die folgenden Deformationsanteile gekennzeichnet /21/:

- Elastisches Verhalten, d. h. zwischen der Dehnung ε_{el} und der Spannung σ besteht ein linearer, zeitunabhängiger Zusammenhang.

$$\varepsilon_{el} = \sigma / E(T) \quad (2.1)$$

E = Elastizitätsmodul, T = Temperatur

- Viskoelastisches Verhalten, d. h. zeitabhängige, irreversible Verformung ε_i ,

$$\varepsilon_i = \sigma / E_r(T) * (1 - e^{-t/\tau}) \quad (2.2)$$

E_r = Relaxationsmodul, τ = Relaxationszeit, t = Zeit

- Viskoses (plastisches) Verhalten, d. h. es besteht eine lineare Abhängigkeit der Dehnung von der Zeit,

$$\varepsilon_i = \sigma * t / \eta_0(T) \quad (2.3)$$

$\eta_0(T)$ = Viskosität

Als eindimensionale Gesamtverformung ε ergibt sich

$$\varepsilon = \sigma * (1/E(T) + t/\eta_0(T) + 1/E_r(T) * (1 - e^{-t/\tau})), \quad (2.4)$$

d. h. bei einer erzwungenen Dehnung und einem nicht rein elastischem Verformungsverhalten nimmt die im Formstoff anliegende Spannung σ mit der Zeit ab. In welchem Maß der Formstoff ein elastisches, viskoelastisches bzw. viskoses Verhalten zeigt, hängt im wesentlichen von der Temperatur und dem molekularen Aufbau des Formstoffes ab /19, 22 - 24/.

Bei einer Biege-Wechselbeanspruchung wird der elastische Anteil der Deformation durch den Speichermodul E' und der viskoelastisch-plastische Anteil durch den Verlustmodul E'' bestimmt /24, 25/. In Abbildung 2.3 sind der Speichermodul E' , der Verlustmodul E'' und der Dämpfungsfaktor $\tan \delta$, der das Verhältnis von E'' zu E' angibt, eines thermoplastischen Kunststoffes über der Temperatur aufgetragen (vgl. Kap. 3.2.1). Ein kleiner $\tan \delta$ -Wert charakterisiert ein elastisches

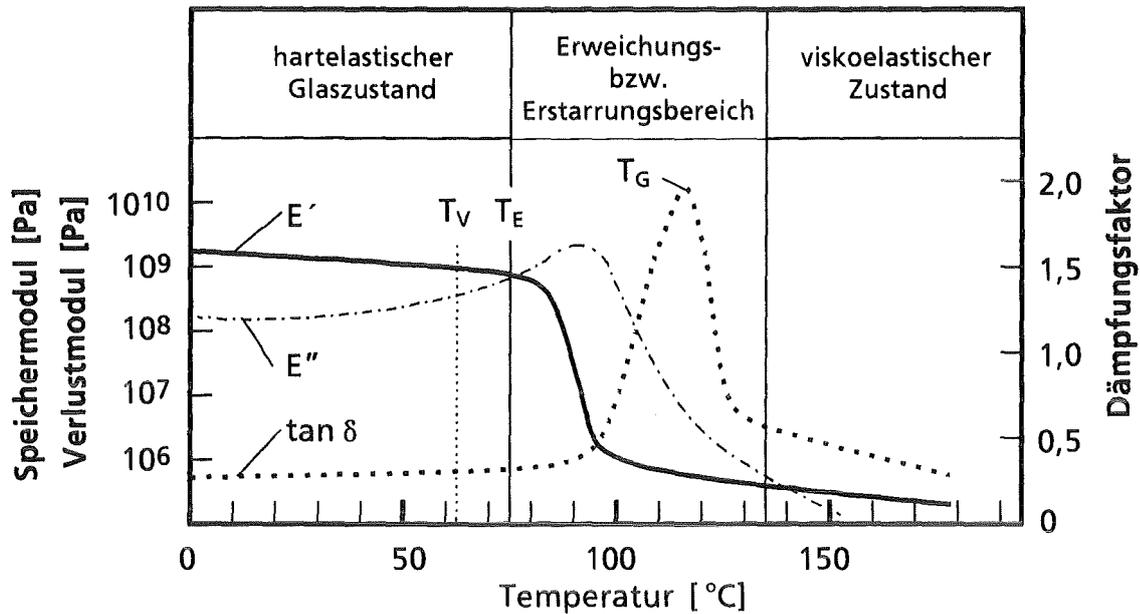


Abb. 2.3: Einfluß der Temperatur auf den Speichermodul E' , den Verlustmodul E'' und den Dämpfungsfaktor $\tan \delta$ eines thermoplastischen Kunststoffes. T_V ist die Versprödungstemperatur, T_E die Erweichungstemperatur und T_G die Glasübergangstemperatur des Formstoffes.

Materialverhalten, während ein hoher $\tan \delta$ -Wert für ein plastisches, flüssigkeitsähnliches Verhalten steht /25/. Unterhalb der Versprödungstemperatur T_V zeigt der Formstoff bei einer Deformation ein annähernd rein elastisches Verhalten. Oberhalb der Versprödungstemperatur nimmt der plastische Anteil der Verformung sehr stark zu. Bei der Erweichungstemperatur T_E beginnt der Formstoff zu erweichen. Die Temperatur, bei der der Dämpfungsfaktor das Maximum erreicht, wird als Glasübergangstemperatur T_G bezeichnet. Die Glasübergangstemperatur kennzeichnet den Übergang in den viskoelastischen Zustand. Dieser Übergang findet jedoch nicht abrupt statt, sondern vollzieht sich vielmehr über einen größeren Temperaturbereich. Mit zunehmender Temperatur nehmen bei thermoplastischen Kunststoffen der elastische Deformationsanteil ab und der viskoelastische und plastische Deformationsanteil zu.

2.2 Fließverhalten der Formmasse beim Prägen

Beim Prägen liegt der Viskositätswert der eingesetzten Formmasse um mehrere Größenordnungen über den Werten der Reaktionsgießharze, die bisher am IMT für die Abformung von Mikrostrukturen eingesetzt wurden. Um trotz der hohen Viskosität der Formmasse auch die Befüllung von Formnestern mit lateralen Abmessungen im Mikrometerbereich zu erreichen, wurde das Fließverhalten der Formmasse beim Prägen untersucht. Zur Beschreibung der Strömung, die sich bei

der Befüllung des Formeinsatzes in den Formnestern und zwischen Formeinsatz und Substrat einstellt, wurden folgende Voraussetzungen angenommen:

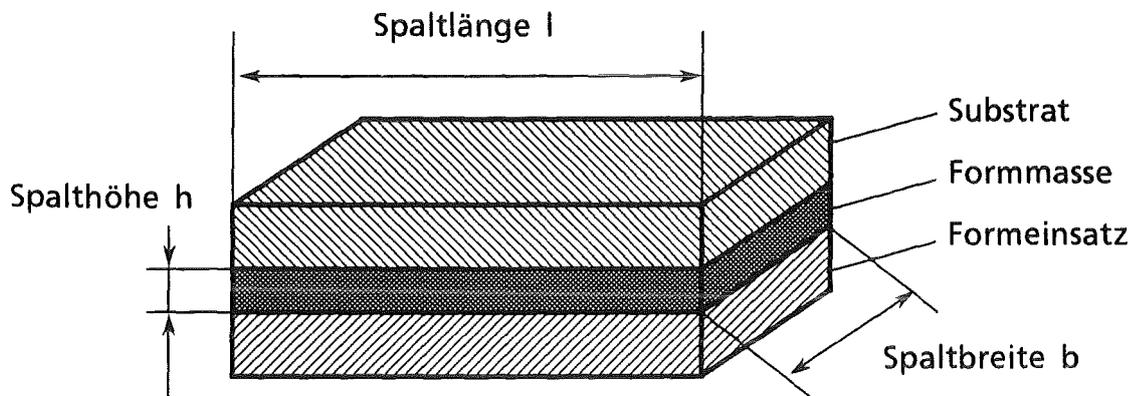
- Die Befüllung des Formeinsatzes findet im Vakuum statt, es muß also keine Luft verdrängt werden.
- Die Formmasse verhält sich wie ein inkompressibles Medium.
- Die Spaltlänge des Formeinsatzes (vgl. Kapitel 3.3.2) ist sehr viel größer als die Spaltbreite.
- Da die Spalthöhe zwischen Formeinsatz und Substrat und die Höhe der zu befüllenden Formnester des Formeinsatzes (siehe Abb. 2.4) zwischen $100\ \mu\text{m}$ und $300\ \mu\text{m}$ liegt, kann die Änderung des hydrostatischen Druckes der Formmasse vernachlässigt werden.
- Da die Abmessungen der Formnester des Formeinsatzes bzw. die Spalthöhe zwischen Formeinsatz und Substrat im Mikrometerbereich liegen und die Viskosität der Formmasse sehr hoch ist (vgl. Kap. 4.2.2), ergibt sich eine niedrige Strömungsgeschwindigkeit und eine Reynoldszahl $Re \ll 1$ /26/, so daß mit einer laminaren Strömung im ebenen Spalt gerechnet werden kann.
- Die in Strömungsrichtung über den Querschnitt des Spaltes gemittelte Strömungsgeschwindigkeit ist näherungsweise konstant, so daß für die Formmasse eine konstante dynamische Viskosität vorausgesetzt werden kann.

Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich in den Formnestern und zwischen Formeinsatz und Substrat eine Poiseuille-Strömung mit einem parabolischen Geschwindigkeitsprofil ($d^2u/dy^2 = \text{konstant}$) /26/. Der Druckabfall $\Delta p(x)$ in Strömungsrichtung x hängt von der Viskosität η der Formmasse, der über den Querschnitt des Spaltes gemittelten Strömungsgeschwindigkeit u_m , vom Fließweg x und der Spalthöhe h zwischen Formeinsatz und Substrat wie folgt ab /26/:

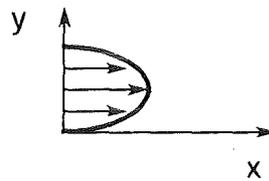
$$\Delta p(x) = \eta * u_m * 12 * x / h^2 \quad (2.5)$$

Damit ist der Druckabfall in Strömungsrichtung konstant, und bei einem vorgegebenen Fließweg x , konstanter Spalthöhe und Viskosität hängt die mittlere Strömungsgeschwindigkeit von der zur Verfügung stehenden Druckdifferenz ab.

a) Spalt zwischen Formeinsatz und Substrat



Spaltströmung $u(y)$



b) Formnest des Formeinsatzes

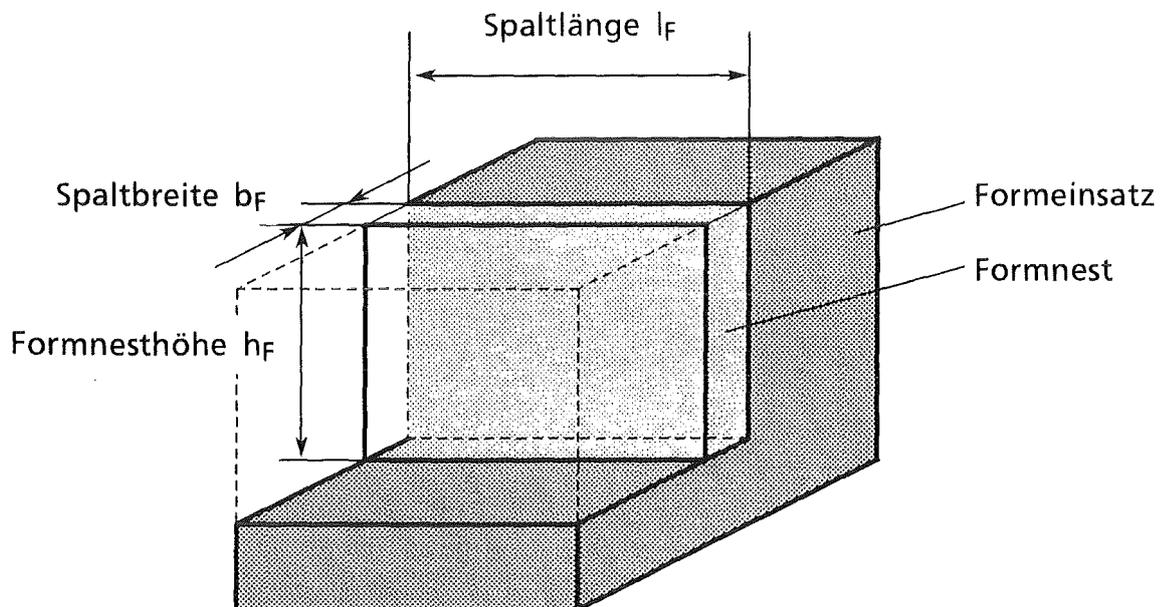


Abb. 2.4: Bezeichnung der Abmessungen zwischen Formeinsatz und Substrat und eines spaltförmigen Formnestes des Formeinsatzes.

2.2.1 Verdrängung der Formmasse zwischen Formeinsatz und Substrat

Durch die Prägekraft F_p , mit der der Formeinsatz beim Prägen auf die Formmasse gedrückt wird, wird in der Formmasse zwischen Formeinsatz und Substrat ein Druck erzeugt. Da nach Gleichung (2.5) der Druckabfall in Strömungsrichtung konstant ist, wird der Druck von der Mitte zum Rand der Formeinsatzgrundfläche gleichmäßig abgebaut (Abb. 2.5). Damit stellt sich zwischen der Prägekraft und dem unter dem Formeinsatz wirkenden Druck folgendes Gleichgewicht ein:

$$F_p = (l - b) * b * p_{\max}/2 + 8 * \int_{-b/2}^{b/2} p(x) * x * dx$$

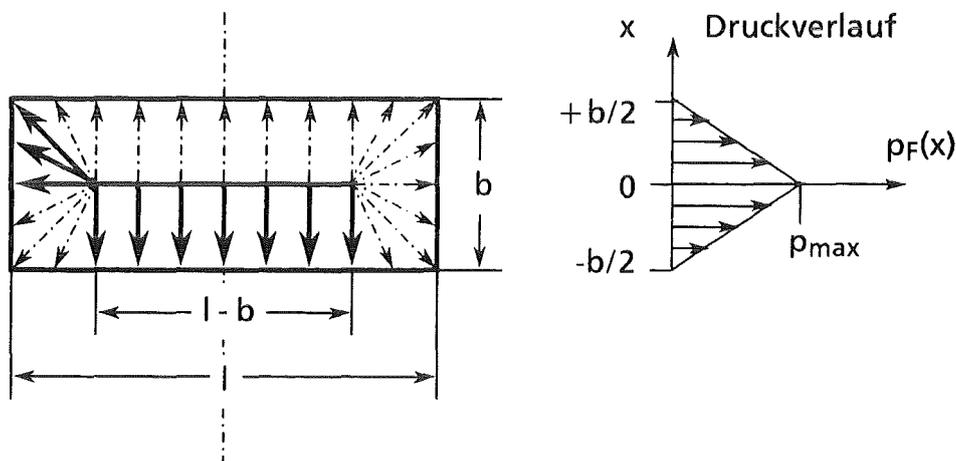


Abb. 2.5: Druckverlauf unter dem Formeinsatz beim Prägen.

Hierbei sind l und b Länge und Breite des Formeinsatzes und p_{\max} ist der maximale Druck in der Mitte des Formeinsatzes ($x=0$). Da der Druck zum Rand der Formeinsatzgrundfläche gleichmäßig abgebaut wird, gilt:

$$p(x) = p_{\max} * (1 - 2 * x/b) \quad \text{für } 0 \leq x \leq b/2 \quad (\text{vgl. Abb. 2.5})$$

$$F_p = p_{\max}/2 * (l * b - b^2/3) \quad (2.6)$$

Da die Formgebung im Vakuum erfolgt, entspricht die maximal zur Verfügung stehende Druckdifferenz dem Maximaldruck ($\Delta p_{(x=0)} = p_{\max}$).

$$\Delta p_{(x=0)} = 2 * F_p / (l * b - b^2/3) \quad (2.7)$$

Bei dieser Betrachtung wurde die zum Ausströmen aus dem Spalt notwendige Druckdifferenz vernachlässigt.

Für den Volumenstrom der verdrängten Formmasse gilt:

$$dV/dt = l * b * (-dh/dt) = 2 * (l + b) * h * u_m \quad (2.8)$$

Aus den Gleichungen (2.5), (2.7) und (2.8) läßt sich die nach der Umformzeit t_u zwischen Formeinsatz und Substrat verbleibende Schichtdicke h der Formmasse errechnen.

$$-\int dh/h^3 = \int 2 * F * (l + b) / [(3 * l - b) * l * b^3 * \eta] dt_u$$
$$h = [2 * F_p * t_u * (l + b) / ((3 * l - b) * l * b^3 * \eta) + 1/h_o^2]^{-0,5} \quad (2.9)$$

Hierbei ist h_o die Schichtdicke der Formmasse zwischen Formeinsatz und Substrat vor dem Prägen.

2.2.2 Befüllung des Formeinsatzes

Die Geschwindigkeit, mit der der Formeinsatzes mit Formmasse befüllt wird, ist abhängig von der Geometrie der Formnester, dem zur Verfügung stehenden Druck $p_F(x)$, der durch die Prägekraft F_p in der Formmasse erzeugt wird und der Viskosität η der Formmasse.

Da der Druck nach Gleichung (2.5) von der Mitte des Formeinsatzes zum Rand hin gleichmäßig abgebaut wird, ergibt sich der Druck $p_F(x)$, der zur Befüllung der Formnester an der Stelle x zur Verfügung steht, aus dem Abstand x von der Mitte des Formeinsatzes und dem maximalen Druck:

$$p_F(x) = p_{max} * (1 - 2 * x/b) \quad \text{für } 0 \leq x \leq b/2 \quad (\text{vgl. Abb. 2.5}) \quad (2.10)$$

Aus dem Druckabfall in den Formnestern des Formeinsatzes und der Kontinuitätsgleichung ergibt sich die zur Befüllung des Formeinsatzes notwendige Zeit t . Für die Befüllung von spaltförmigen Formnestern, deren Spaltlänge l_F sehr viel größer als die Spaltbreite b_F ist, ergibt sich aus Gleichung (2.1)

$$t = 12 * (h_F/b_F)^2 * \eta / p_F(x) \quad (2.11)$$

und entsprechend für die Befüllung von zylindrischen Formnestern

$$t = 8 * (h_F/R_F)^2 * \eta / p_F(x) \quad (2.12)$$

Hierbei sind h_F die Formnesthöhe, b_F die Spaltbreite (siehe Abb. 2.4), R_F der Radius eines zylindrischen Formnestes und $p_F(x)$ der an der Stelle x des Formeinsatzes (vgl. Abb. 2.5) zur Verfügung stehende Druck.

2.3 Modell zur Beschreibung des Einflusses der Prägekraft und der Entformtemperatur auf die Entformkraft

Für die Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern und die Entformung von Mikrostrukturen mit minimalen lateralen Abmessungen sind geringe Entformkräfte notwendig. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell beschreibt den Einfluß der Prägekraft und der Entformtemperatur auf die zur Entformung der Mikrostrukturen notwendigen Entformkraft.

Durch die Prägekraft wird unter dem Formeinsatz ein Druck erzeugt, durch den die Formmasse in die Formnester des Formeinsatzes fließt. Dadurch entsteht in den Mikrostrukturen eine allseitige Druckspannung, durch die die Mikrostrukturwände gegen die sie umgebenden Wände des Formeinsatzes gedrückt werden. Die bei der Entformung an den senkrechten Wänden der Mikrostrukturen auftretenden Reibkräfte hängen von der Druckspannung in den Mikrostrukturen ab. Neben den Reibkräften treten bei der Entformung an den senkrechten Mikrostrukturwänden, der Stirnseite der Mikrostrukturen und an den waagerechten Flächen zwischen den Mikrostrukturen im Strukturgrund Adhäsionskräfte auf.

Da der Formstoff (PMMA) einen deutlich größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als der Formeinsatz (Nickel) besitzt, kommt es bei der Abkühlung von der Prägetemperatur T_p zur Entformtemperatur T_e zu unterschiedlichen Längenänderungen. Je nach Mikrostrukturgeometrie kann deshalb die beim Prägen erzeugte Druckspannung in den Mikrostrukturen bei der Abkühlung erhöht oder verringert werden. So schrumpfen z. B. Hohlzylinder-Mikrostrukturen bei der Abkühlung auf den Innenzylinder des Formeinsatzes auf (siehe Anhang). Werden freistehende, säulenförmige Strukturen abgeformt, z. B. Wabenprismen, so ziehen sich diese beim Abkühlen stärker zusammen als der sie umgebende Formeinsatz. Dadurch wird die Druckspannung in den Mikrostrukturen verringert. Aufgrund der einfachen Geometrie der Wabenprismen-Mikrostrukturen (vgl. Kap. 3.3.2) läßt sich der Einfluß der Entformtemperatur auf die Entformkraft allgemein beschreiben.

Die in den Mikrostrukturen (Wabenprismen) beim Entformen auftretenden Zugspannungen wurden unter folgenden Voraussetzungen berechnet:

- Idealerweise besitzen Formeinsatz und Substrat den gleichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, so daß bei der Abkühlung zwischen Formeinsatz und Substrat keine Schubspannungen auftreten.
- Um die Formnester des Formeinsatzes zu befüllen, muß die Formmasse mit Druck beaufschlagt werden. Durch den Druck der Formmasse würden die

Mikrostrukturen ohne Formeinsatz eine Volumenzunahme um ΔV erfahren. In erster Näherung ergibt sich:

$$\Delta V / V = - p_{MS} * 3 * (1 - 2 * \nu_{MS}) / E \quad (2.13)$$

(p_{MS} = Druck in den Formnestern, ν_{MS} = Querkontraktionszahl, E = Elastizitätsmodul)

- Unterhalb der Versprödungstemperatur wird das Verformungsverhalten der Kunststoff-Mikrostrukturen als rein elastisch angesehen. Ab dieser Temperatur kann die Verringerung der Druckspannung σ_D durch Relaxation vernachlässigt werden.
- Bei der Entformung der Mikrostrukturen ist die an den senkrechten Wänden zwischen den Mikrostrukturen aus Formstoff und Formeinsatz wirkende Haftung/Reibung sehr viel größer als die Adhäsionskraft an den waagrechten Wänden (vgl. Kap. 4.3.2). Aus diesem Grund wird die Adhäsionskraft der waagrechten Wände vernachlässigt.
- Aus der Druckspannung σ_D , der Fläche der senkrechten Mikrostrukturwände (A_{MS}) und dem Haftreibungskoeffizienten μ_H zwischen Mikrostruktur und Formeinsatz ergibt sich die Haftreibungskraft einer Mikrostruktur F_H , die bei der Entformung überwunden werden muß:

$$F_H = \sigma_D * A_{MS} * \mu_H \quad (2.14)$$

Damit ergibt sich die zur Entformung aller Mikrostrukturen eines Formeinsatzes notwendige Entformkraft F_E aus der Summe der Haftkräfte aller Mikrostrukturen:

$$F_E = \sum F_{H_i} = \sum (\sigma_D * A_{MS} * \mu_H)_i \quad (2.15)$$

Die Entformkraft hängt also direkt von der in den Mikrostrukturen anliegenden Druckspannung ab. Die Druckspannung in den Mikrostrukturen wird durch den Druck erzeugt, mit dem die Formmasse beim Prägen in die Formnester des Formeinsatzes gedrückt wird. Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Mikrostrukturen aus Formstoff (MS) und des Formeinsatzes (F) wird bei der Abkühlung in den Mikrostrukturen eine Volumenänderung hervorgerufen und dadurch die Druckspannung verringert. Abbildung 2.6 zeigt für den eindimensionalen Fall ein Ersatzschaubild, das für die Berechnung der thermisch bedingter Dehnung und der daraus folgenden Spannungsänderung verwendet wurde.

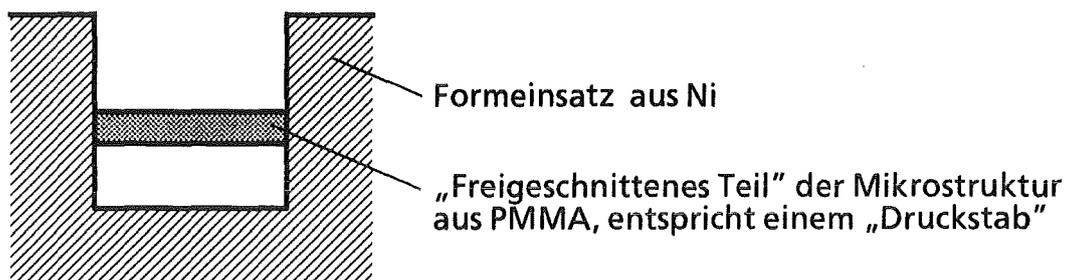


Abb. 2.6: Ersatzschaubild für den eindimensionalen Fall. Bei einer Temperaturverringerung zieht sich der „Druckstab“ aus PMMA stärker zusammen als der ihn umgebende Formeinsatz aus Nickel. Dadurch nimmt die Druckspannung im „Druckstab“ ab.

Eine Temperaturänderung ΔT führt in der Mikrostruktur zu einer thermischen Dehnung ε_t :

$$\varepsilon_t = (\alpha_{MS} - \alpha_F) * \Delta T \quad (2.16)$$

Hierbei sind α_{MS} und α_F die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Mikrostruktur aus Formstoff bzw. des Formeinsatzes aus Nickel. Die thermische Dehnung wird durch eine mechanische Dehnung ε_m kompensiert:

$$\varepsilon_m = \Delta\sigma * (1 - 2 * \nu_{MS}) / E_{MS} \quad (2.17)$$

Da der Elastizitätsmodul des Formeinsatzes ca. 100mal größer ist als der des Formstoffes (bei 23°C), kann die elastische Dehnung des Formeinsatzes vernachlässigt werden, die durch die Druckspannung im Formstoff hervorgerufen wird.

Im dreidimensionalen Fall ergibt sich die Volumenänderung:

$$V + \Delta V = (1 + \Delta l)^3 \quad (2.18)$$

und bei Vernachlässigung der Terme höherer Ordnung (Fehler < 1%) folgt:

$$\Delta V_i / V_i = 3 * \Delta l_i / l_i = 3 * \alpha_i * \Delta T \quad (2.19)$$

Unter der Annahme, daß zumindestens im Strukturgrund des Formeinsatzes ein dreiachsiger Spannungszustand vorliegt, gilt:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \sigma * (1 - 2 * \nu_{MS}) / E_{MS} \quad (2.20)$$

Hieraus ergibt sich die Änderung der Druckspannung $\Delta\sigma_D$ in den Mikrostrukturen, die durch die Temperaturdifferenz ΔT hervorgerufen wird:

$$\Delta\sigma_D = \Delta T * E_{MS} * (\alpha_{MS} - \alpha_F) / (1 - 2 * \nu_{MS}) \quad (2.21)$$

Die in den Mikrostrukturen anliegende Druckspannung ergibt sich aus der bei der Versprödungstemperatur vorhandenen Anfangsspannung $\sigma_{D,0}$ ($= p_{MS,0}$) und der

temperaturbedingten Änderung der Druckspannung. Hierbei sind sowohl der Elastizitätsmodul als auch der thermische Ausdehnungskoeffizient der Mikrostrukturen aus Formstoff temperaturabhängig (vgl. Kap. 4.2). Der thermische Ausdehnungskoeffizient des Formeinsatzes aus Nickel ist zwischen Prägetemperatur und der Entformtemperatur nahezu konstant /27/.

$$\sigma_D = \sigma_{D,0} + \Delta T * E_{MS}(T) * (\alpha_{MS}(T) - \alpha_F) / (1 - 2 * \nu_{MS}), \quad (2.22)$$

Beim Abkühlen der Mikrostrukturen ($\Delta T < 0$) nimmt die Druckspannung und damit die zur Entformung notwendige Entformkraft ab.

Durch die Druckspannung und die Haftung/Reibung zwischen Formeinsatz und Mikrostruktur wird bei der Entformung an den senkrechten Wänden der Mikrostruktur A_{MS} eine Schubspannung erzeugt (siehe Abbildung 2.7). Da die Schub-

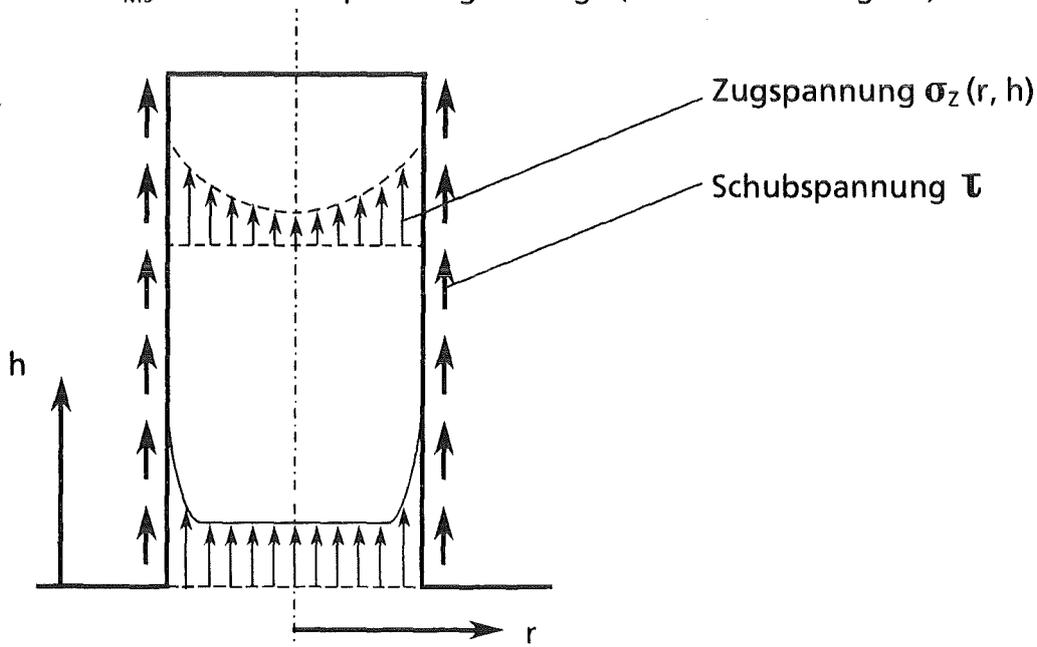


Abb. 2.7: Qualitativer Verlauf der Zugspannung bei der Entformung einer einzelnen, säulenförmigen Mikrostruktur.

spannung nur an den senkrechten Wänden der Mikrostruktur angreift, entsteht in den Mikrostruktur eine inhomogene Verteilung der Zugspannung σ_z mit einer Spannungsüberhöhung am Mikrostrukturrand. Die Spannungsüberhöhung wird durch den Faktor k_1 berücksichtigt. Die Querschnittsänderung im Strukturgrund (zwischen Mikrostruktur und Formstoff auf der Substratoberfläche) führt zu einer zusätzlichen Spannungsüberhöhung im Strukturgrund:

$$\sigma_z = \sigma_D * \nu_{MS} * k_1 * k_2 * A_{MS} / A_G \quad (2.23)$$

$k_2 =$ Kerbfaktor

Das Verhältnis der Oberfläche der senkrechten Wände einer Mikrostruktur A_{MS} zu deren Grundfläche A_G wird als Flächenverhältnis bezeichnet (vgl. Kap.3.3.2). In Abbildung 2.7 ist der qualitative Verlauf der Zugspannung in einer Mikrostruktursäule aufgetragen.

2.4 Abformverfahren

Zum Aufbau von LIGA-Mikrostrukturen auf mikroelektronischen Schaltungen wurde im Rahmen dieser Arbeit das im folgenden beschriebene Abformverfahren entwickelt. Mit diesem Verfahren können Mikrostrukturen aus Kunststoff und aus galvanisch abgeschiedenem Metall auf der strukturierten Oberfläche von prozessierten Wafern abgeformt werden.

Im Gegensatz zu den bisher am IMT eingesetzten Abformverfahren, bei denen die Mikrostrukturen durch Vakuum-Reaktionsguß mit Gießharzen erzeugt wurden, werden beim neuen Abformverfahren die Mikrostrukturen durch Prägen eines Formstoffes im Vakuum erzeugt.

Bei den bisherigen Abformverfahren wurde zunächst der Formeinsatz mit Gießharz befüllt und dieses im Formeinsatz ausgehärtet. Um den bei der Polymerisation auftretenden Schwund zu kompensieren, mußte das Gießharz bis zum Ende der Polymerisation mit einem hohen Druck (100 bar) beaufschlagt werden. Im Gegensatz hierzu findet beim neuen Abformverfahren die Polymerisation des Gießharzes bereits vor der Formgebung und damit außerhalb des Formeinsatzes statt. Deshalb muß der bei der Polymerisation auftretende Reaktionsschwund nicht unbedingt durch einen hohen Nachdruck (100 bar) kompensiert werden, sondern kann auch bei einem geringen Druck (5 bar) durch ein größeres Anfangsvolumen ausgeglichen werden. Hierfür wird die Schichtdicke des Reaktionsgießharzes genau so weit erhöht, daß der Reaktionsschwund bei der Polymerisation gerade ausgeglichen wird. Die Formgebung durch Prägen findet erst nach der vollständigen Aushärtung des Formstoffes statt. Da das Gießharz nicht mehr im Formeinsatz aushärten muß, ergeben sich für den Strukturierungsprozeß erheblich kürzere Zykluszeiten.

Als Grundlage für die Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern wurde beim Prägen die Befüllung des Formeinsatzes mit Formmasse und Entformung der Mikrostrukturen untersucht. Beim Abformverfahren, das in Abbildung 2.8 dargestellt ist, wird zunächst eine Galvanikstartschicht, z. B. Ti oder Cr/Ag, auf den prozessierten Wafer aufgebracht. Um die Haftung des aufpolymerisierten Formstoffes und der später aufzugalvanisierenden Mikrostrukturen auf der Titanschicht zu verbessern, wird das Ti zusätzlich naßchemisch oxidiert [7].

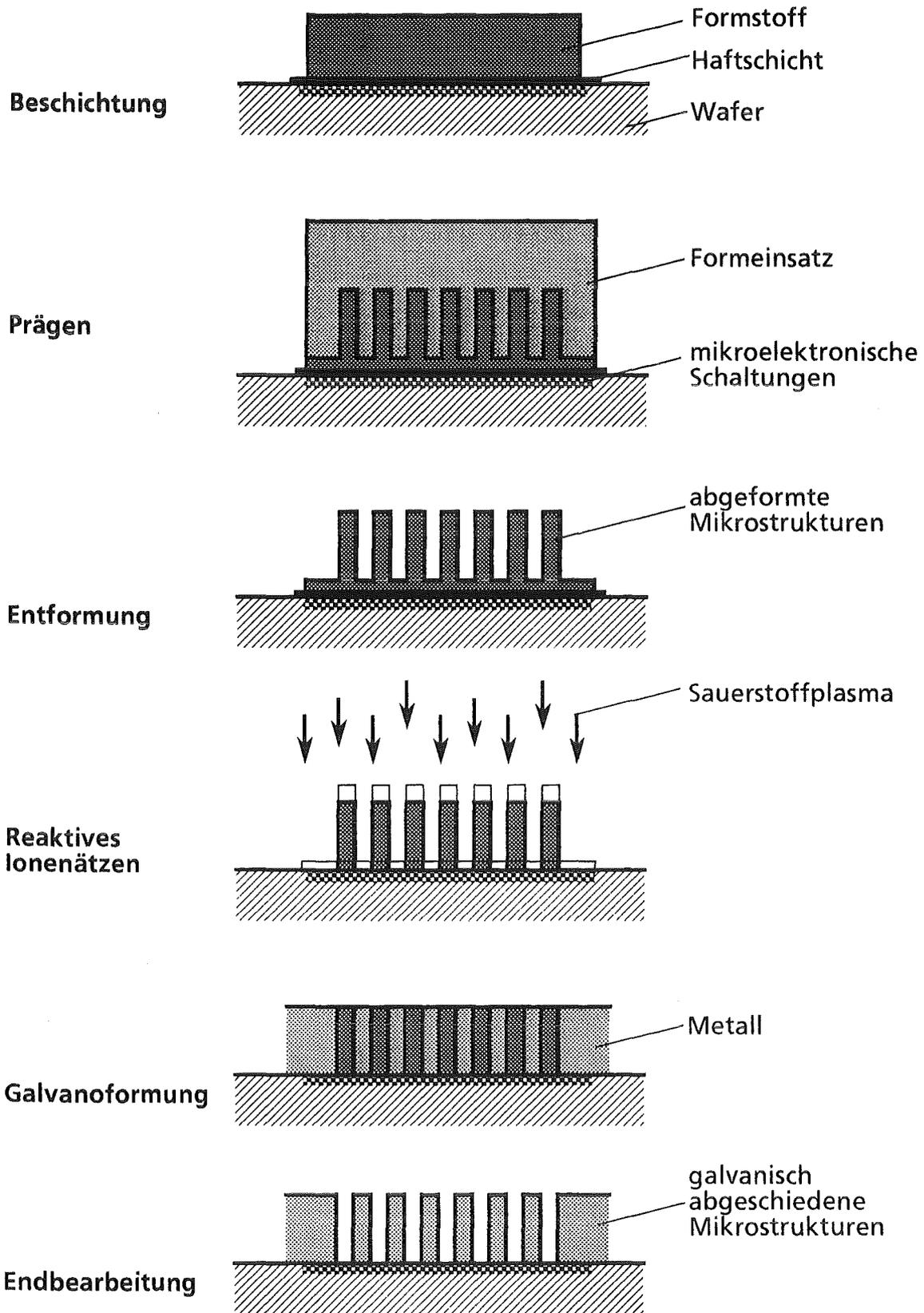


Abb. 2.8: Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern.

Anschließend werden eine nur wenige Mikrometer dicke Haftschrift und darauf der Formstoff für die Mikrostrukturen aufpolymerisiert. Haftschrift und Formstoff sind aus reaktionsgegossenem PMMA und unterscheiden sich im wesentlichen durch die Zugabe eines internen Haftvermittlers bzw. Trennmittels (vgl. Kap. 3.1 und 3.2). Nach der Aushärtung des Formstoffes werden Wafer mit Formstoff und Formeinsatz auf eine Temperatur, die oberhalb der Glasübergangstemperatur des Formstoffes liegt, erwärmt. Der Formstoff befindet sich jetzt in einem viskoelastisch-plastischen Zustand und wird als Formmasse bezeichnet. Die Strukturierung der Formmasse erfolgt durch Eindringen des Formeinsatzes im Vakuum. Um bei der Strukturierung die mikroelektronischen Schaltungen durch den Formeinsatz nicht mechanisch zu beschädigen, wird der Abformprozeß so gefahren, daß zwischen Formeinsatz und Wafer eine dünne Restschicht aus Formmasse unter den abgeformten Mikrostrukturen über der Galvanikstartschicht verbleibt. Anschließend werden Wafer und Formeinsatz auf eine Temperatur, die unter der Glasübergangstemperatur des Formstoffes liegt, abgekühlt und die Mikrostrukturen entformt.

Um zwischen den abgeformten PMMA-Strukturen, die als "verlorene Formen" dienen, Mikrostrukturen aus Metall aufzugalvanisieren, muß zunächst die im Strukturgrund über der Galvanikstartschicht vorhandene Restschicht aus Formstoff entfernt werden. Dies geschieht durch reaktives Ionenätzen im Sauerstoffplasma. Durch eine geeignete Wahl der Ätzparameter wird ein stark anisotropes Ätzen erreicht, so daß der Ätzabtrag fast ausschließlich im Strukturgrund und an der Stirnseite der Mikrostrukturen stattfindet.

Nach dem Freilegen der Galvanikstartschicht lassen sich zwischen den Strukturen aus Formstoff Mikrostrukturen aus Metall aufgalvanisieren. Anschließend kann die Stirnseite der Mikrostrukturen mechanisch überarbeitet werden [28]. Der Formstoff läßt sich durch Auflösen selektiv entfernen. Zum Schluß wird die Galvanikstartschicht zwischen den Mikrostrukturen aus Metall entfernt.

3. Aufbau und Durchführung der Versuche

Im folgenden Kapitel werden die zur Untersuchung der Haftschrift und des Formstoffes eingesetzten Methoden vorgestellt und die bei der Abformung von Mikrostrukturen eingesetzte Laboranlage, die verwendeten Formeinsätze, die Formgebung durch Prägen des Formstoffes und die Entformung der Mikrostrukturen beschrieben.

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Versuche wurden mit dem Gießharz Plexit 60 (Firma Röhm, Darmstadt) durchgeführt. Das Gießharz ist eine Mischung aus 70 Gew.% Methylmethacrylat (MMA), in dem 30 Gew.% PMMA mit einem mittleren gewichteten Molekulargewicht (M_w) von ca. 110.000 g/mol gelöst sind [18]. Um die radikalische Polymerisation des MMA bei Raumtemperatur zu starten, wurde dem Gießharz als Initiator (Radikalbildner) Dibenzoylperoxid (BPO) und zur chemischen Aktivierung N,N-Dimethylanilin (DMA) zugemischt.

3.1 Untersuchung der Haftschrift

Weil die Haftung des Formstoffes auf prozessierten Wafern und anderen Substratoberflächen nicht zur Übertragung der für die Entformung der Mikrostrukturen notwendigen Entformkraft ausreicht, wird auf die Substratoberfläche zunächst eine dünne Haftschrift aufpolymerisiert.

3.1.1 Zusammensetzung der Haftschrift

Um eine möglichst gute Haftung der Haftschrift auf der Substratoberfläche zu erreichen, wurden dem Gießharz Methacryloxypropyltrimethoxysilan (MEMO), Hydroxyethylmethacrylat (HEMA) oder Hydroxyethylmethacrylatphosphat (HEMA-Phosphat) zugemischt. Durch die Zugabe von niederviskosem MMA zum Gießharz Plexit 60 wird die Viskosität des Gießharzes verringert. Dadurch können Haftschriften mit einer Dicke von 10 μm und darunter hergestellt werden. Die Haftschriften wurden aus Gießharzen mit folgender Zusammensetzung hergestellt: 80 Teile Plexit 60, 20 Teile MMA, 2 Teile BPO, 1 Teil DMA und Haftvermittler. Hierbei beziehen sich die Mengenangaben auf Gewichtsanteile, bezogen auf 100 Teile Plexit 60 mit MMA. Nach der Mischung der einzelnen Komponenten wurde das Gießharz blasenfrei auf das Substrat auf eine Fläche von ca. 4.000 mm^2 aufgegossen, mit einer Stahlfolie abgedeckt und durch Aufbringen einer Kraft von ca. 500 N verdrängt.

Die Mischung der Gießharze und die Aushärtung zur Haftschrift erfolgte bei Raumtemperatur.

3.1.2 Bestimmung der Zugfestigkeit der Verbindung Haftschrift - Titanoxid

Für die Herstellung galvanisierbarer Mikrostrukturen wird beim LIGA-Verfahren in vielen Fällen auf die Substratoberfläche eine ca. 2 μm dicke Schicht aus Titan aufgesputtert und diese Schicht anschließend naßchemisch oxidiert (TiO_x) /7/. Die TiO_x -Schicht ermöglicht einerseits eine ausreichende Haftung der Mikrostrukturen aus PMMA, ist andererseits elektrisch leitfähig und ermöglicht damit die galvanische Abscheidung von Mikrostrukturen aus Metall zwischen den PMMA-Strukturen /29/.

Um eine möglichst gute Haftung der Haftschrift auf der TiO_x -Oberfläche zu erreichen, wurden der Haftschrift unterschiedliche Haftvermittler zugemischt und die Zugfestigkeit der Verbindung Haftschrift- TiO_x mit Hilfe einer rechnergesteuerten Zugprüfmaschine (Fa. Instron, Offenbach, Typ 4505) bestimmt.

Hierfür wurde die Stirnseite von Kupferzylindern poliergefräst und eine ca. 2 μm dicke Titanschicht aufgesputtert. Anschließend wurde die Titanschicht naßchemisch oxidiert /7/ und jeweils 2 Kupferzylinder (mit TiO_x) mit der zu untersuchenden Haftschrift bei Raumtemperatur verklebt (Abbildung 3.1).

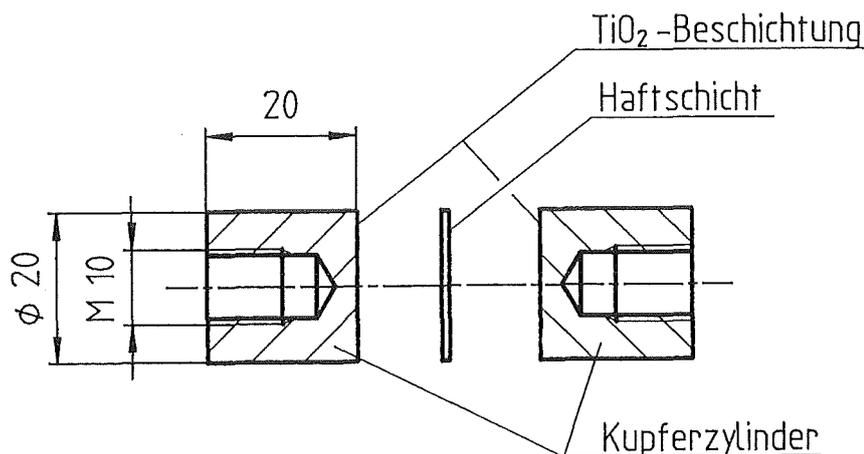


Abb 3.1: Abmessungen der Proben, die zur Bestimmung der Zugfestigkeit der Verbindung Haftschrift - Titanoxid eingesetzt wurden /30/.

Während der Polymerisation wurden die Kupferzylinder zusammengedrückt und dadurch in der Haftschrift ein Druck von ca. 0,9 MPa erzeugt. Nach der Aushärtung des Gießharzes wurden die Proben zur Verringerung des Restmono-

meranteils in der Haftschrift und zum Abbau von Eigenspannungen getempert. Hierfür wurden die Proben mit 15 K/h auf 110 °C aufgeheizt, 1 Stunde bei 110 °C gehalten und anschließend mit 8 K/h auf 45 °C abgekühlt.

3.2 Untersuchung des Formstoffes

In den folgenden Abschnitten werden die Methoden beschrieben, mit denen der Einfluß der Temperatur und der Zusammensetzung des Gießharzes auf die Materialeigenschaften des Formstoffes untersucht wurden.

Die Zusammensetzung der Gießharze, aus denen der jeweilige Formstoff hergestellt wurde, ist in Tabelle 3.1 wiedergegeben. Um die Reibung zwischen Form-einsatz und den Mikrostrukturen herabzusetzen, wurde dem Formstoff ein internes Trennmittel (PAT 665, Fa. Würz, Bingen) zugemischt. Die Polymerisation der Gießharze erfolgte bei Raumtemperatur.

Gießharz	Grundstoff	Trennmittel	Initiator	Aktivator
	Plexit 60	PAT 665	BPO	DMA
a)	100 Teile	0 Teile	3 Teile	1,5 Teile
b)	100 Teile	1 Teil	3 Teile	1,5 Teile
c)	100 Teile	2 Teile	3 Teile	1,5 Teile
d)	100 Teile	3 Teile	3 Teile	1,5 Teile
e)	100 Teile	4 Teile	3 Teile	1,5 Teile
f)	100 Teile	3 Teile	2 Teile	1 Teil
g)	100 Teile	3 Teile	4 Teile	2 Teile

Tab. 3.1: Zusammensetzung der Gießharze, aus denen die Formstoffe zum Prägen von Mikrostrukturen hergestellt wurden. Alle Angaben beziehen sich auf Gew. Teile.

3.2.1 Bestimmung des Speichermoduls und der Glasübergangstemperatur

Die Dynamische Mechanische Thermische Analyse (DMTA) ermöglicht die quantitative Erfassung des Speichermoduls E' und des Verlustmoduls E'' von Kunststoffen. Hierzu können Temperatur und Aufheizrate der Probe sowie über die Frequenz und deren Betrag (Amplitude) die Belastungsgeschwindigkeit variiert werden.

Die beidseitig eingespannte Probe wird in einer temperaturgeregelten Umgebung periodisch deformiert und die Deformation mit einem linear variablen Differential-Transformator /31/ gemessen. Ein Teil der durch die Deformation

zugeführten Energie führt in der Probe zu einer elastischen Verformung, der verbleibende Anteil verursacht eine plastische Verformung und führt zu einer Erwärmung der Probe. Aus dem elastischen und plastischen Anteil der Verformung werden der Speichermodul E' und der Verlustmodul E'' bestimmt. Der sogenannte Dämpfungsfaktor $\tan \delta$ ergibt sich aus dem Verhältnis von E'' zu E' . Die Glasübergangstemperatur T_G ist durch den Maximalwert des Dämpfungsfaktors definiert /25/.

Aus Gießharzen mit 0 bis 4 Gew. Teilen Trennmittel (siehe Tab. 3.1, a - e) wurden bei Raumtemperatur Proben mit den Abmessungen $40 \times 10 \times 1,1 \text{ mm}^3$ gegossen und nach der Aushärtung des Gießharzes zu Formstoff bei 110°C getempert. Die Proben wurden mit einer DMTA-Apperatur (Fa. Polymer Laboratories, Loughborough, Typ Mk II) untersucht. Hierzu wurden die Proben in eine 4-Punkt-Einspannung eingebaut (siehe Abbildung 3.2), mit einer Biegewechselbeanspruchung (Anregungsfrequenz 1 Hz, Amplitudenauslenkung $64 \mu\text{m}$) belastet und mit 2 K/min von 25°C auf 160°C aufgeheizt. Die Reproduzierbarkeit des Speichermoduls lag unter $\pm 4\%$, die der Glasübergangstemperatur unter $\pm 2\text{K}$.

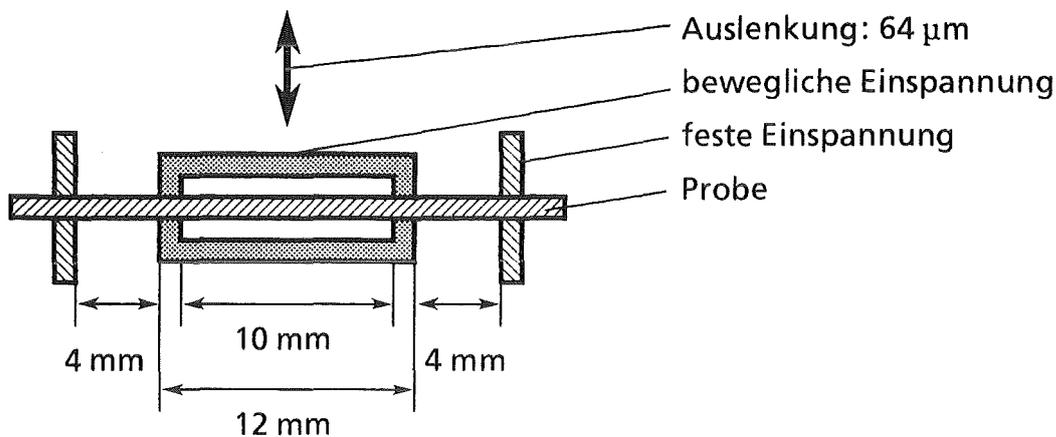


Abb. 3.2: Einspannung der Probe in die DMTA-Apparatur. Über die bewegliche Einspannung wird die Probe mit einer Biegewechselbeanspruchung belastet.

3.2.2 Bestimmung der dynamischen Viskosität

Eine wesentliche Einflußgröße für die Befüllung des Formeinsatzes ist die Viskosität der Formmasse. Da die Formmasse wie viele andere thermoplastische Formstoffe kein ideal viskoses Verhalten zeigt, ist die dynamische Viskosität von der Belastungsgeschwindigkeit abhängig, d. h. zwischen Schubspannung und Schergeschwindigkeit besteht keine lineare Abhängigkeit /23, 32/. Aus diesem Grund wurde die dynamische Viskosität der Formmasse unter ähnlichen Bedingungen wie bei der Befüllung des Formeinsatzes beim Prägen von Mikrostrukturen bestimmt. In Abbildung 3.3 ist der Versuchsaufbau wiedergegeben.

Mit einer konstanten Kraft wurde die Formmasse zwischen 2 Platten verdrängt und die Änderung des Plattenabstandes über der Zeit aufgetragen. Durch Umstellung der Formel 2.9 (Kap. 2.2.1) ergibt sich:

$$\eta_1 = [2 * F * t * (l + b)] / [(3 * l * b) * l * b^3 * (1/h^2 - 1/h_0^2)] \quad (3.1)$$

Hierbei sind l und b die Länge und Breite der Platten und F die Kraft, mit der die obere Platte auf die Formmasse gedrückt wird. In der Zeit t verringert sich der Abstand zwischen den Platten und damit der Schichtdicke der Formmasse vom Anfangswert h_0 auf h .

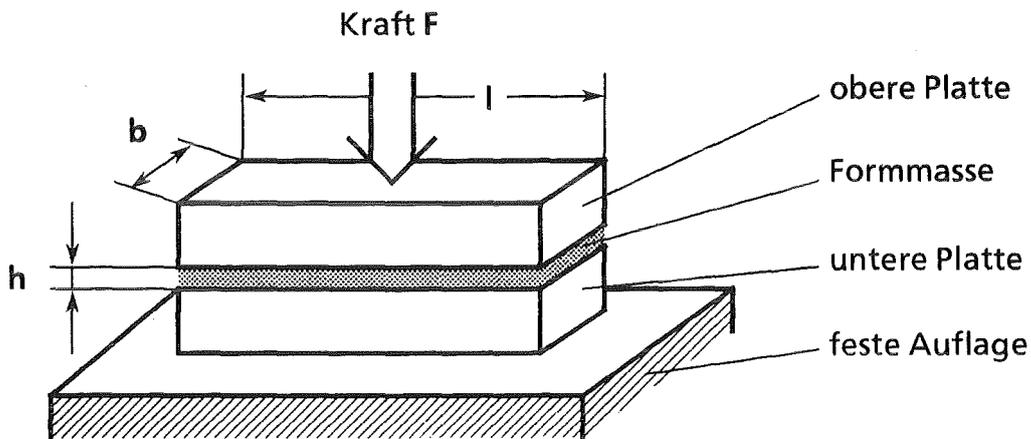


Abb. 3.3: Aufbau des Kriechversuches zur Bestimmung der dynamischen Viskosität der Formmasse. Die Formmasse wurde bei konstanter Temperatur und konstanter Kraft zwischen 2 Platten verdrängt und aus der Änderung der Schichtdicke h die dynamische Viskosität bestimmt.

Auf eine Stahlplatte wurde der Formstoff bei Raumtemperatur aufpolymerisiert und anschließend die Probe 1 Stunde bei $110\text{ }^\circ\text{C}$ getempert. Danach wurde die Probe in eine für Kriechversuche ausgerüstete Zugprüfmaschine des KfK-Instituts IMF II (Fa. Instron, Typ 4500) eingebaut und auf die Prüftemperatur aufgeheizt. Die Prüftemperaturen lagen zwischen $140\text{ }^\circ\text{C}$ und $185\text{ }^\circ\text{C}$. Um während des Versuchs die Wegänderung, die durch die thermische Dehnung des gesamten Versuchsaufbaus verursacht wird, möglichst gering zu halten, wurden die Versuche erst 2 Stunden nach Beginn der Aufheizung durchgeführt. Dadurch lag die Fehlmessung durch die thermische Dehnung des Versuchsaufbaus unter $3\text{ }\mu\text{m/h}$. Der gesamte Kriechversuch wurde kraftgesteuert durchgeführt. Während der Aufheizung und Abkühlung wurde die obere Platte mit einer Druckkraft von 30 N beaufschlagt. Die Prüfkraft von 5 kN wurde mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 20 kN/min aufgebracht. Während der gesamten Versuchsdauer wurde der Verfahrweg und die anliegende Kraft über der Zeit aufgezeichnet. Der Fehler bei der Aufzeichnung des Weges lag unter $1\text{ }\mu\text{m}$.

Parallel hierzu wurde die dynamische Viskosität aus dem Speichermodul E' , dem Verlustmodul E'' und der Anregungsfrequenz ω der DMTA-Messungen (vgl. Kap. 3.2.1) nach Gleichung 3.2 /32/ bestimmt.

$$\eta = [(E')^2 + (E'')^2]^{0,5} / \omega \quad (3.2)$$

Oberhalb von 80 °C nimmt der Speichermodul E' und damit die Belastungsgeschwindigkeit $\dot{\sigma}$ mit zunehmender Temperatur stark ab (vgl. Abb. 4.3).

$$\dot{\sigma} = \varepsilon * E' * \omega * k$$

Hierbei ist ε die elastische Dehnung in der Probe, die durch die zyklische Auslenkung (vgl. Abb. 3.2) erzeugt wird. Die Probengeometrie wird durch den Faktor k berücksichtigt. Da die dynamische Viskosität der Formmasse von der Belastungsgeschwindigkeit abhängt, wurde das Produkt aus $E' * \omega$ konstant gehalten, d. h. die Anregungsfrequenz mit abnehmendem Speichermodul erhöht.

3.2.3 Bestimmung des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten

Nach dem Prägen werden die Mikrostrukturen aus Formstoff und der sie umgebende Formeinsatz auf die Entformtemperatur abgekühlt. Um die durch die Abkühlung verursachte Schrumpfung der Mikrostrukturen aus Formstoff berechnen zu können, wurden der thermische Ausdehnungskoeffizient des Formstoffes mit unterschiedlichen Trennmittelanteilen (Tab. 3.1, a, c - e) mit einer thermomechanischen Analyseeinrichtung (TMA, Fa. Netsch, Selb, Typ 402) bestimmt. Hierzu wurden aus Formstoff zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 5 mm und einer Höhe von ca. 6 mm hergestellt und anschließend bei 110 °C getempert. Zur Bestimmung des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten wurden die Proben mit 2 K/min. von Raumtemperatur auf 150 °C aufgeheizt und dabei die thermisch bedingte Längenänderung der Probe über der Temperatur aufgezeichnet. Thermoplastische Kunststoffe gehen bei der Erwärmung vom hartelastischen Glaszustand in den Erweichungsbereich über. Die Erweichung der Probe macht sich durch das Einsinken des Prüfstempels und eine scheinbare Abnahme der thermischen Längenänderung bemerkbar.

Zur Übertragung der Längenänderung wurde ein Prüfstempel mit einer zylindrischen Prüfspitze, Durchmesser 1 mm, verwendet. Die Prüfkraft lag bei 0,01 N.

Der gemittelte thermische Längenausdehnungskoeffizient zwischen einer oberen und einer unteren Temperatur (T_o , T_u) wurde wie folgt bestimmt:

$$\alpha (T_o, T_u) = (\Delta l (T_o) - \Delta l (T_u)) / (l_o * (T_o - T_u))$$

Hierbei sind l_0 die Probenlänge bei 23 °C, $\Delta l(T)$ die Längenänderung der Probe bei der Temperatur T und $\alpha(T_0, T_u)$ der gemittelte thermische Längenausdehnungskoeffizient zwischen T_0 und T_u .

Der gerätebedingte Meßfehler der TMA-Apparatur, der durch die thermische Ausdehnung der Probenhalterung und des Meßaufnehmers bei der Aufheizung entsteht, liegt unter 5%.

3.2.4 Bestimmung der Zugeigenschaften

Um den Einfluß der Temperatur sowie des Trennmittels und des Initiators im Formstoff auf die Zugfestigkeit⁶⁾ (σ_B), die 0,2%-Dehnspannung ($\sigma_{S0,2}$), die Reißdehnung (ϵ_R) sowie den Elastizitätsmodul (E) des Formstoffes zu bestimmen, wurden in Anlehnung an DIN 53455 Zugstäbe aus Formstoff hergestellt. Mit einer rechnergesteuerten Zugprüfmaschine (Fa. Instron, Typ 4505) wurden die Werkstoffkennwerte bestimmt. Die äußeren Abmessungen der Zugstäbe sind in Abbildung 3.4 wiedergegeben.

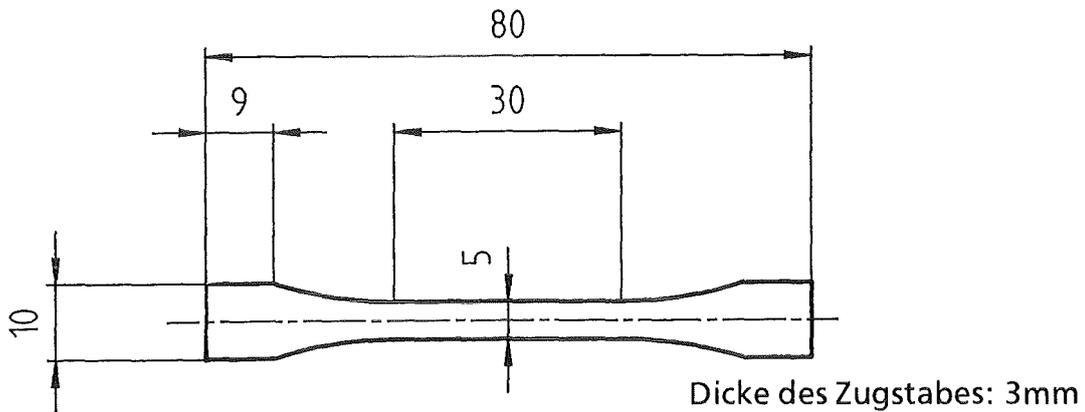


Abb 3.4: Abmessungen der Zugstäbe aus Formstoff

Die Zugstäbe aus Formstoff wurden ebenfalls mit dem Gießharz Plexit 60 hergestellt. Dabei wurden der Anteil des internen Trennmittels (PAT 665), des Initiators (BPO) sowie des chemischen Aktivators (DMA) variiert. Die eingesetzten Gießharze sind in Tabelle 3.1 zusammengefaßt.

Zur Herstellung der Zugstäbe wurde das jeweilige Gießharz unter einem Druck von ca. 5 MPa in einer Metallform ausgehärtet, aus der Form entfernt und anschließend getempert. Hierzu wurden die Zugstäbe an Luft von Raumtemperatur mit 15 K/h auf 110 °C aufgeheizt, 1h bei 110 °C gehalten, anschließend mit 8 K/h auf 45 °C abgekühlt und 24h bei 45 °C gehalten.

6) Bezeichnung nach DIN 7745, Teil 2, "Polymethylmethacrylat"

Alle Zugversuche wurden an Luft zwischen Raumtemperatur und 100 °C durchgeführt. Als Prüfgeschwindigkeit wurde 2 mm/s gewählt, um so den Formstoff unter den gleichen Bedingungen wie bei der Entformung der Mikrostrukturen mit der Laboranlage RIM 3 zu untersuchen.

3.3 Abformung von Mikrostrukturen

3.3.1 Laboranlage zur Abformung von Mikrostrukturen

Die in dieser Arbeit beschriebenen Abformversuche wurden mit der im IMT aufgebauten, rechnergesteuerten Laboranlage RIM 3 (RIM = Reaction Injection Molding, Reaktionsguß) durchgeführt. Mit dieser Laboranlage können Mikrostrukturen sowohl im Reaktionsguß als auch durch Prägen von thermoplastischen Kunststoffen erzeugt werden. In dieser Arbeit wurde lediglich von der zweiten Möglichkeit Gebrauch gemacht. Die Laboranlage ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Sie umfaßt im wesentlichen eine Vakuumkammer (1); oben und unten je eine beheizbare Platte (2), die gleichzeitig zur Aufnahme von Formeinsatz bzw. Substrat dienen; die rechnergesteuerte, hydraulische Schließeinheit (3), mit der die Vakuumkammer geschlossen und beim Prägen die Prägekraft auf den Formeinsatz (4) aufgebracht wird; den Entformkraftaufnehmer (5), den Behälter (6) für das Reaktionsgießharz, mit dem der Formeinsatz bei der Abformung im Reaktionsguß über einen Angußkanal befüllt wird sowie die Kraftmeßzelle (7) zur Bestimmung der Schließkraft.

In Abbildung 3.5 ist die Laboranlage mit bereits geschlossener Vakuumkammer, im Zustand vor der Formgebung dargestellt. Zum Ein- und Ausbau der Substrate und zum Wechsel des Formeinsatzes wird die Vakuumkammer mit der hydraulischen Schließeinheit geöffnet.

Für die Herstellung von Mikrostrukturen durch Prägen wird der Formeinsatz in eine Halterung montiert und diese an die obere Platte angeschraubt. Das Substrat wird über eine Halterung an der unteren Platte befestigt. Nachdem Formeinsatz und Substrat in der Laboranlage eingebaut sind, wird die Vakuumkammer in die Evakuierposition gefahren. In dieser Stellung ist die Vakuumkammer bereits geschlossen, aber zwischen Formeinsatz und dem auf der Substatoberfläche aufpolymerisierten Formstoff befindet sich ein Spalt. Durch die Evakuierung der Vakuumkammer ($p_v < 1$ mbar) werden auch die Formnester des Formeinsatzes evakuiert. Formeinsatz und Substrat können über die obere und untere Platte mit Öl temperiert werden. Außerdem lassen sich beide Platten unabhängig voneinander elektrisch aufheizen.

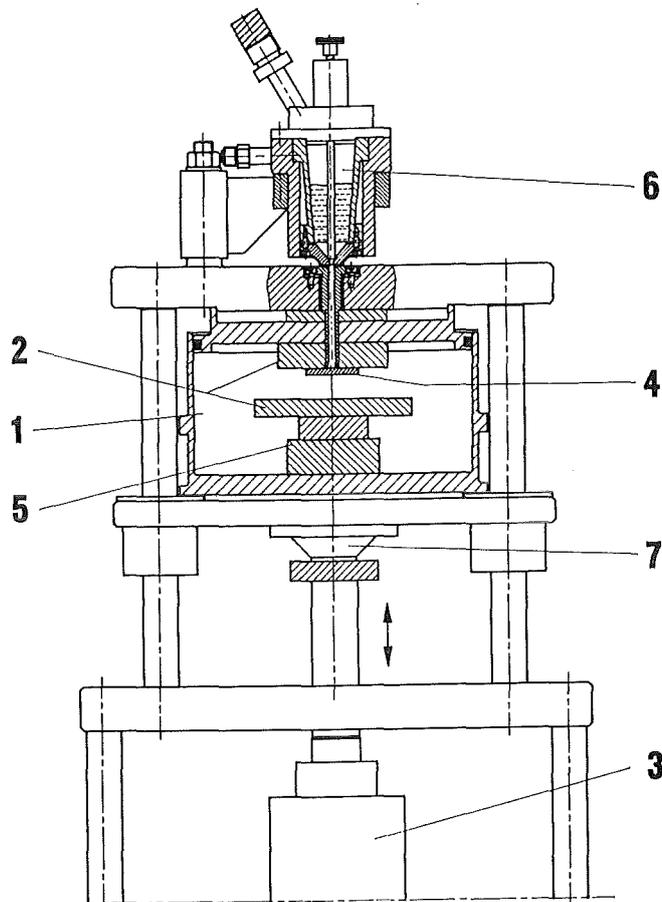


Abb. 3.5: Laboranlage RIM 3 zur Abformung von Mikrostrukturen aus Kunststoff.

Nachdem Formeinsatz und Substrat auf eine vorgegebene Temperatur aufgeheizt sind, erfolgt die Formgebung durch Eindrücken des Formeinsatzes in die Formmasse. Die Formgebung kann sowohl kraft- als auch weggesteuert erfolgen. Wird die Laboranlage kraftgesteuert betrieben, so beträgt die minimale Schließkraft mehrere 100 N. Bei evakuierter Vakuumkammer ergibt sich durch die Druckdifferenz zur Umgebung eine zusätzliche Schließkraft von rund 4,6 kN. Über die hydraulische Schließeinheit kann eine maximale Schließkraft von 50 kN aufgebracht werden. Die Geschwindigkeit zum Öffnen und Schließen der Vakuumkammer und des Abformwerkzeugs kann zwischen 1 mm/s und 20 mm/s variiert werden. Mit einem Meßwertfassungssystem lassen sich die Temperaturen der oberen und unteren Platte und des Formeinsatzes sowie der Verfahrweg, die Schließkraft und die Entformkraft während des Versuches aufzeichnen /33/.

3.3.2 Formeinsätze zur Abformung von Mikrostrukturen

Zur Abformung von Mikrostrukturen wurden Formeinsätze eingesetzt, die nach dem LIGA-Verfahren hergestellt wurden. Hierbei wurden zunächst durch Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung Mikrostrukturen aus PMMA auf einer leitfähigen Substratplatte erzeugt. Aus diesen Strukturen wurde in einem zweiten Arbeitsschritt ein Formeinsatz aus Nickel durch Übergalvanisieren der Strukturen bis zu einer Dicke von ca. 5 mm und einer mechanischen Bearbeitung hergestellt. Die Herstellung von Formeinsätzen wird in /17, 18/ ausführlich beschrieben.

Zur Untersuchung der Abformung von Mikrostrukturen wurden zwei verschiedene Formeinsätze eingesetzt. Die Geometrie der Formnester ist in Abbildung 3.6 skizziert.

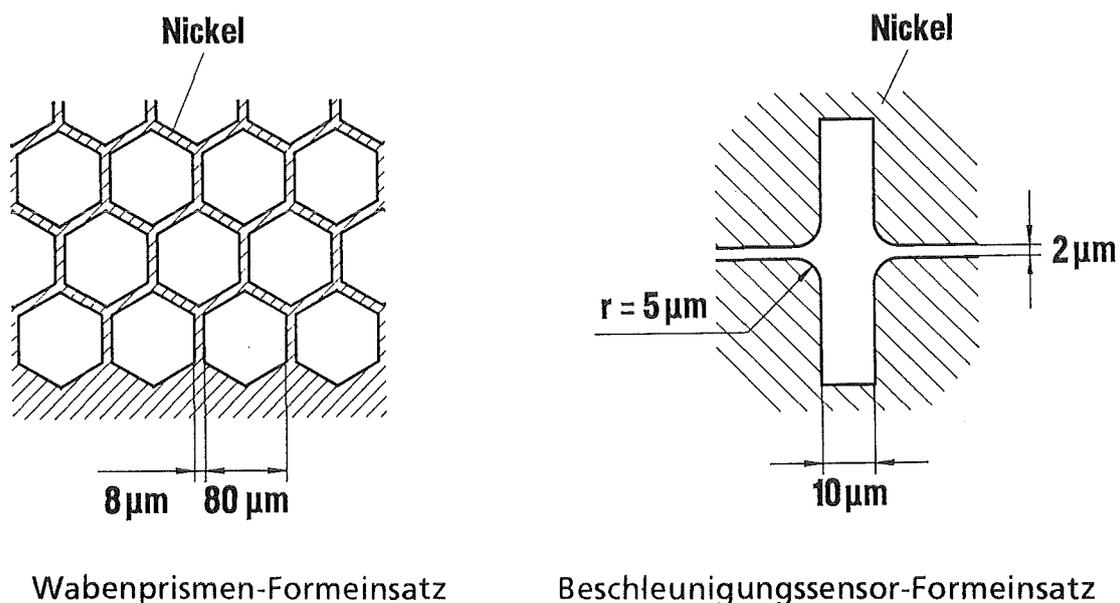


Abb. 3.6: Skizze der Formnestgeometrie (Ausschnitt) der in dieser Arbeit eingesetzten Formeinsätze. Die Darstellung ist nicht maßstäblich.

Der Wabenprismen-Formeinsatz hat auf einer Fläche von $10,4 * 46,5\ \text{mm}^2$ 74.400 wabenförmige Formnester mit einem Innendurchmesser von $80\ \mu\text{m}$ und einer Formnesttiefe von $200\ \mu\text{m}$. Die Metallstege der Formnester sind ca. $8\ \mu\text{m}$ breit.

Der Beschleunigungssensor-Formeinsatz wurde zur Abformung von Kunststoffformen für die Galvanoformung von Beschleunigungssensoren⁷⁾ hergestellt und weist mit einer minimalen Formnestbreite von $2\ \mu\text{m}$ deutlich geringere laterale Abmessungen als der Wabenprismen-Formeinsatz auf. Die spaltförmigen $2\ \mu\text{m}$

7) Bisher wurden die Beschleunigungssensoren durch Röntgentiefenlithographie und Galvanoformung hergestellt /6, 13/.

breiten Formnester sind alle $110\ \mu\text{m}$ mit $10\ \mu\text{m}$ breiten Formnestern verbunden, die senkrecht auf den spaltförmigen Formnestern stehen. Die Formnesttiefe des Formeinsatzes beträgt $100\ \mu\text{m}$.

Abbildung 3.7 zeigt einen Ausschnitt des Beschleunigungssensor-Formeinsatzes.

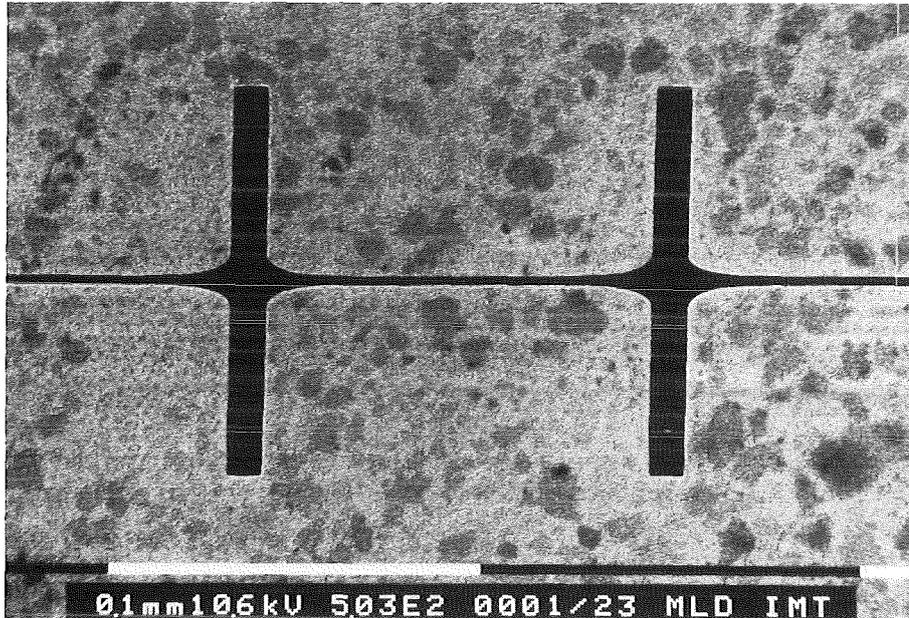


Abb 3.7: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Ausschnitts der Formnester des Beschleunigungssensor-Formeinsatzes. Die waagerechten spaltförmigen Formnester sind rund $2\ \mu\text{m}$ breit, die senkrecht dazu stehenden Formnester sind $10\ \mu\text{m}$ breit.

In Tabelle 3.2 sind die Abmessungen und die charakteristischen Kenngrößen der beiden Formeinsätze zusammengefaßt.

Die Geometrie und die Abmessungen der abzuformenden Mikrostrukturen haben einen entscheidenden Einfluß auf die Befüllung des Formeinsatzes mit Formmasse sowie auf die Entformbarkeit der Mikrostrukturen (vgl. Kap. 2.2 und 2.3). Der Bedeckungsgrad des Formeinsatzes, der das Verhältnis von Stirnfläche der Mikrostrukturen aus Metall zur gesamten Stirnfläche des mikrostrukturierten Bereichs des Formeinsatzes angibt, ist beim Prägen ein Maß für die Verdrängung der Formmasse im strukturierten Bereich des Formeinsatzes.

Das Flächenverhältnis gibt das Verhältnis der senkrechten Wände einer Mikrostruktur zu deren Grundfläche an. Bei der Entformung greift die Reibkraft an den senkrechten Wänden der Mikrostrukturen an. Bei einer konstanten Entformkraft wird bei einer kleineren Grundfläche in den Mikrostrukturen eine hohe Zugspannung erzeugt. Deshalb ist das Flächenverhältnis ein Maß für die Entformbarkeit der Mikrostrukturen. Während der Wabenprismen-Formeinsatz aufgrund der $80\ \mu\text{m}$ breiten Formnester relativ problemlos mit Formmasse befüllt und entformt werden kann, sind die Anforderungen beim Beschleunigungs-

Formeinsatz:	Wabenprismen	Beschleunigungssensor
Formnesttiefe:	200 μm	100 μm
min. Abmessungen		
a) Formeinsatz	8 μm	20 μm
b) abgef. Strukturen	80 μm	2 μm
Bedeckungsgrad	17,5 %	30,3 %
Flächenverhältnis	10	100
Strukturierte Fläche:		
Länge	46,5 mm	61 mm
Breite	10,4 mm	7,9 mm
Formeinsatz-Länge	66 mm	66 mm
Formeinsatz-Breite	26 mm	26 mm

Tab. 3.1: Abmessungen und charakteristische Größen der Formeinsätze, die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt wurden. Der Bedeckungsgrad gibt das Verhältnis der Stirnfläche der Mikrostrukturen aus Metall zur gesamten Stirnfläche des mikrostrukturierten Bereichs des Formeinsatzes an. Das Flächenverhältnis gibt das Verhältnis der senkrechten Wände einer Mikrostruktur zu deren Grundfläche an.

sensor-Formeinsatz wesentlich höher. Das Flächenverhältnis der 2 μm breiten Formnester beträgt 100 und ist damit zehnmal so groß wie beim Wabenprismen-Formeinsatz.

3.3.3 Formgebung durch Prägen

Beim Prägen erfolgt die Formgebung durch Eindrücken des Formeinsatzes in die Formmasse.

Hierfür wurden auf die Substrate - Si-Wafer, prozessierte Wafer sowie geschliffene Stahl⁸⁾- und Invarplatten - eine wenige μm dicke Haftschrift (vgl. Kap. 3.1) und auf die Haftschrift der eigentliche Formstoff (vgl. Kap. 3.2) aufpolymerisiert. Nach der Aushärtung des Formstoffes wurden die beschichteten Substrate 1 Stunde bei 110 °C getempert.

Die mit Formstoff beschichteten Substrate und der Formeinsatz wurden über Haltevorrichtungen in die Abformapparatur RIM 3 eingebaut und die Vakuumkammer geschlossen. In der evakuierten Vakuumkammer wurden Formeinsatz und Substrat auf 165 °C aufgeheizt. Die Formgebung erfolgte durch Eindrücken

8) Stahlsorte: St 37

des Formeinsatzes in die Formmasse. Die hierzu notwendige Prägekraft wurde zwischen 20 kN und 54 kN variiert. 5 Minuten nach dem Prägebeginn (siehe Abbildung 3.8) wurden Formeinsatz und Substrat abgekühlt. Die Entformung der Mikrostrukturen erfolgte zwischen Raumtemperatur und 60 °C.

Die Abbildung 3.8 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperatur und der Prägekraft bei der Abformung. Aufheizung, Prägen der Formmasse und Abkühlung erfolgten im Vakuum.

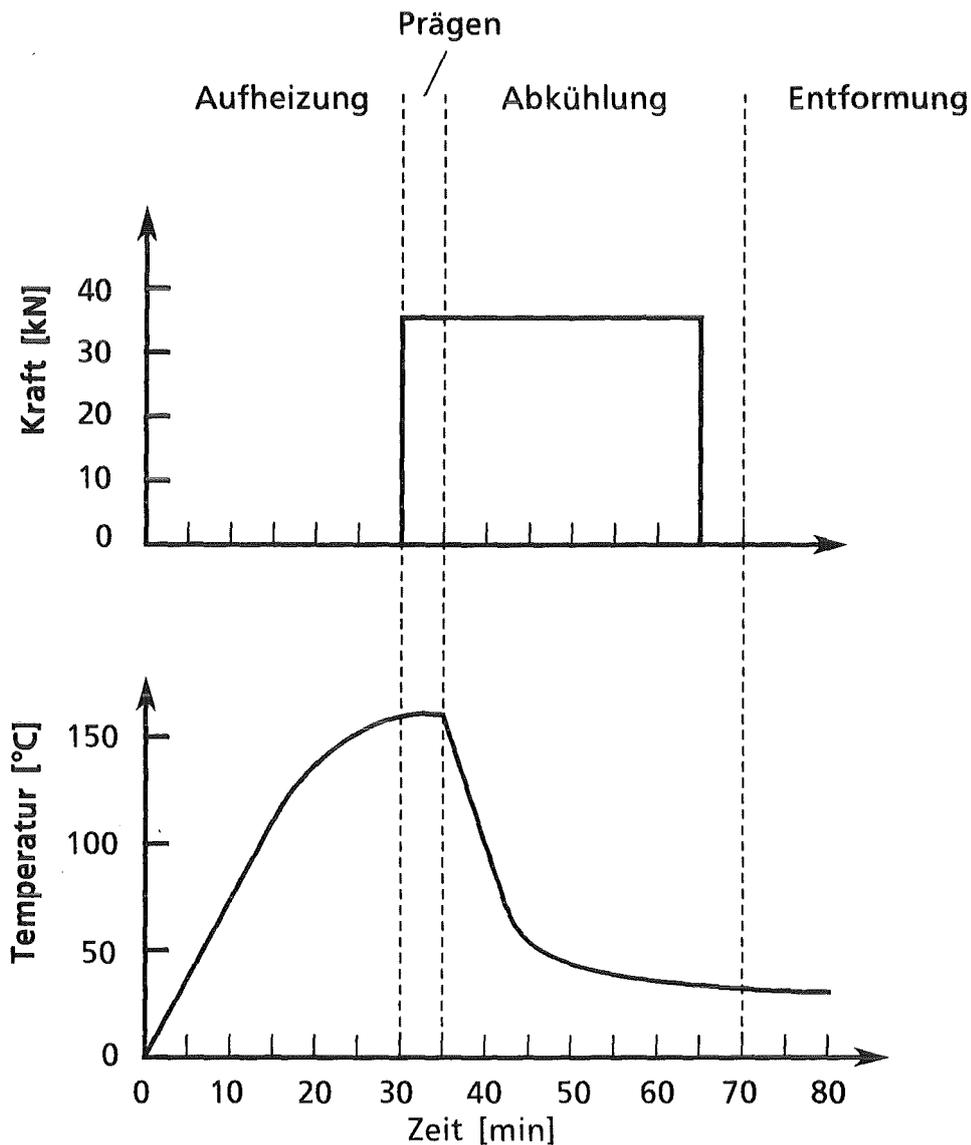


Abb. 3.8: Zeitlicher Verlauf der Temperatur und Prägekraft bei der Abformung von Mikrostrukturen mit der Laboranlage RIM 3.

3.3.4 Entformung der Mikrostrukturen

Bei der Abformung von Mikrostrukturen ist die zur Entformung notwendige Entformkraft von entscheidender Bedeutung.

Ziel der hierzu durchgeführten Untersuchungen war es, die Entformkraft zu minimieren und das in dieser Arbeit entwickelte Modell (Kap. 2.3) zu überprüfen, das den Einfluß der Prägekraft und der Entformtemperatur auf die Entformkraft beschreibt.

Mit dem in Kap. 3.3.2 vorgestellten Wabenprismen-Formeinsatz (80 µm-Wabenprismen) wurden auf verschiedenen Substraten Mikrostrukturen durch Prägen (siehe Kap. 3.3.3) erzeugt und der Einfluß des Trennmittelgehalts im Formstoff, der Entformgeschwindigkeit⁹⁾, der Prägekraft und der Entformtemperatur auf die zur Entformung der Mikrostrukturen notwendige Entformkraft bestimmt.

Für die Messung der Entformkraft und zur Bestimmung der Materialeigenschaften des Formstoffes im Zugversuch steht am IMT eine rechnergesteuerte Zugprüfmaschine (Fa. Instron, Typ 4505) zur Verfügung. Bei der Zugprüfmaschine können Versuche mit einer Prüfgeschwindigkeit zwischen 1 µm/min und 1 m/min ($\pm 0,1\%$) durchgeführt werden. Zur Kraftmessung wurde eine 10 kN-Kraftmeßdose verwendet, deren Fehler bei weniger als 0,5% der gemessenen Kraft lag. Die Temperaturkammer der Zugprüfmaschine ermöglicht Messungen zwischen -150 °C und 350 °C /34/.

Da die Entformkraft mit der Zugprüfmaschine wesentlich genauer als mit der Laboranlage RIM 3 gemessen werden kann und außerdem mit der Zugprüfmaschine eine sehr viel geringere Entformgeschwindigkeit möglich ist, wurden Formeinsatz und Substrat bei Raumtemperatur aus der Abformapparatur ausgebaut und die Mikrostrukturen mit der Zugprüfmaschine entformt. Die Prüfgeschwindigkeit wurde zwischen 0,1 µm/s und 5.000 µm/s und die Entformtemperatur zwischen 23 °C und 60 °C variiert. Unterhalb der Versprödungstemperatur des Formstoffes (ca. 65 °C, vgl. Kap.4.2.4) findet praktisch keine Spannungsrelaxation der Mikrostrukturen statt, so daß die Kompatibilität zur Entformung mit der Laboranlage RIM 3 gewährleistet ist.

9) Die Entformgeschwindigkeit bei der Laboranlage RIM 3 beträgt 2mm/s.

4. Experimentelle Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Abformung galvanisierbarer Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern und damit auf mikroelektronischen Schaltungen entwickelt. Im Gegensatz zu den bisher am IMT eingesetzten Abformverfahren, bei denen die Mikrostrukturen aus Reaktionsharz hergestellt wurden, werden die Mikrostrukturen auf den prozessierten Wafern durch Prägen eines thermoplastischen Formstoffes erzeugt:

Auf einen prozessierten Wafer mit einer elektrisch leitfähigen Oberfläche wird eine wenige μm dicke Haftschrift und darauf der Formstoff aufpolymerisiert. Bei einer Temperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur des Formstoffes wird dieser durch Eindrücken des Formeinsatzes im Vakuum strukturiert. Um hierbei die mikroelektronischen Schaltungen auf dem prozessierten Wafer nicht durch den Formeinsatz mechanisch zu beschädigen, verbleibt zwischen dem Formeinsatz und dem prozessierten Wafer eine dünne Restschicht aus Formstoff. Nach der Entformung der Mikrostrukturen wird diese Restschicht durch reaktives Ionenätzen im Sauerstoffplasma entfernt. Zwischen den Mikrostrukturen aus Formstoff werden Mikrostrukturen aus Metall aufgalvanisiert. Zum Schluß wird der Formstoff selektiv aufgelöst.

Als Grundlagen zum Prägen wurden die Eigenschaften des Formstoffes, die Befüllung des Formeinsatzes mit Formmasse und die Entformkraft in Abhängigkeit des Trennmittelanteils im Formstoff, der Entformgeschwindigkeit, der Prägekraft und der Entformtemperatur untersucht.

Zur Erzeugung von metallischen Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern wurde der Abtrag der Restschicht aus Formstoff zwischen den abgeformten Mikrostrukturen im Sauerstoffplasma untersucht und die galvanische Abscheidung von Mikrostrukturen aus Nickel und Kupfer auf der im Sauerstoffplasma freigeätzten Galvanikstartschicht (TiO_x) nachgewiesen.

Im folgenden wird über die Versuchsergebnisse berichtet.

4.1 Haftschrift

Beim Entformen der Mikrostrukturen werden Formeinsatz und prozessierter Wafer, auf dem die Mikrostrukturen haften sollen, auseinandergezogen. Um die zur Entformung der Mikrostrukturen notwendige Entformkraft vom prozessierten Wafer auf die Mikrostrukturen übertragen zu können, muß zwischen dem prozessierten Wafer und den Mikrostrukturen eine feste Verbindung erreicht werden. Da die strukturierte Oberfläche des Formeinsatzes wesentlich größer ist

als die gegenüberliegende Oberfläche der mikroelektronischen Schaltungen des Wafers und auf diesem keine makroskopische, formschlüssige Verbindung besteht, muß eine gute Haftung zwischen dem prozessierten Wafer und den Mikrostrukturen erreicht werden. Deshalb wurde unter Verwendung eines Haftvermittlers eine stoffschlüssige Verbindung realisiert. Neben der Haftung auf dem prozessierten Wafer muß der Formstoff eine geringe Haftung gegenüber dem Formeinsatz aufweisen. Daraus ergeben sich für den Formstoff zwei unterschiedliche Forderungen: Zwischen dem Formstoff und dem prozessierten Wafer muß eine gute Haftung und zwischen Formstoff und Formeinsatz eine geringe Haftung erreicht werden.

Um beide Bedingungen zu erfüllen, wurden die Funktionen "gute Haftung zum Wafer" und "geringe Haftung zum Formeinsatz" durch einen zweischichtigen Aufbau des Formstoffes getrennt. Der Formstoff besteht aus einer dünnen Haftschiicht auf dem Wafer, auf die der eigentliche Formstoff, der ein internes Trennmittel enthält, aufpolymerisiert wird. Als Haftschiicht wurde ein Gießharz auf Methylmethacrylatbasis (siehe Kap. 3.1.1) mit internen Haftvermittlern eingesetzt. Art und Menge des Haftvermittlers wurde auf das Haftvermögen hin optimiert. In den folgenden Abschnitten wird die Eignung verschiedener Haftschiichten für unterschiedliche Substratoberflächen vorgestellt.

4.1.1 Haftschiichten für Titanoxid

Sollen auf einen prozessierten Wafer Mikrostrukturen aus Metall aufgalvanisiert werden, so muß dessen Oberfläche mit einer elektrisch leitfähigen Schicht versehen werden. Da sich eine Titanoxidschiicht (TiO_x) sowohl als Galvanikstartschicht zum Aufgalvanisieren von Mikrostrukturen aus Metall eignet, als auch eine haftfeste Verbindung zu Mikrostrukturen aus PMMA ermöglicht /7, 29/, wurden die Wafer mit TiO_x beschichtet. Um die Haftung von PMMA auf der TiO_x -Schicht auch beim Entformen zu gewährleisten, wurden dem PMMA interne Haftvermittler - MEMO, HEMA oder HEMA-Phosphat¹⁰⁾ - zugesetzt.

Die Abbildung 4.1 zeigt die Strukturformel des Haftvermittlers MEMO und den Haftungsmechanismus auf einer Oxidschiicht.

Am Beispiel des MEMO wird der Haftungsmechanismus nach /7/ folgendermaßen erklärt: Zunächst erfolgt beim MEMO eine Hydrolyse des Silans zu Silanol. Die Silanolgruppen reagieren über eine Kondensationsreaktion mit der hydrolysierten Oxidschiicht zu einer Siloxanverbindung. Da gleichzeitig eine Autokonden-

10) Die internen Haftvermittler MEMO, HEMA und HEMA-Phosphat und ihr Haftungsmechanismus auf einer Metalloxidoberfläche werden in /7/ beschrieben.

Methacryloxypropyltrimethoxysilan (MEMO)

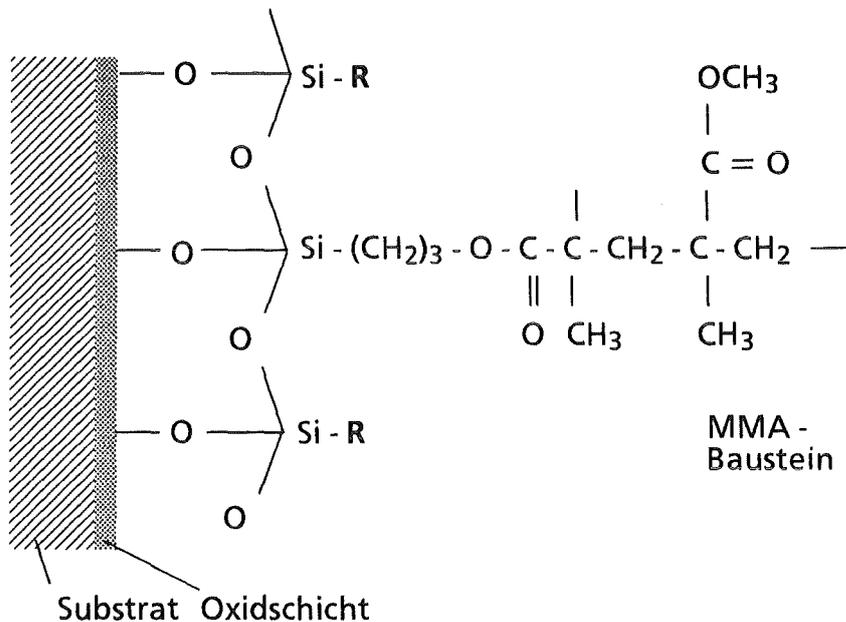
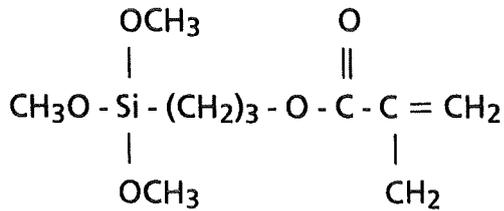


Abb. 4.1: Strukturformel und Haftungsmechanismus von Methacryloxypropyltrimethoxysilan (MEMO) auf einer Oxidschicht. Über die Methacryl-Gruppe ist eine feste chemische Verbindung zu den Makromolekülen des PMMA möglich [7].

sation zweier Silanolgruppen stattfinden kann, bildet sich ein an die Metalloberfläche gebundenes Netzwerk aus Siloxanen. Neben der Silangruppe weist MEMO auch eine reaktionsfähige C=C-Doppelbindung auf, über die bei der Polymerisation der Haftschrift eine feste chemische Verbindung zu den Makromolekülen des PMMA erfolgen kann.

Die Zugfestigkeit der Verbindung TiO_x /Haftschrift wurde an makroskopischen Proben bei Raumtemperatur bestimmt (vgl. Kap. 3.1.2). Bei der Bestimmung der Zugfestigkeit der Haftschrift auf TiO_x wurde die Verbindung bis zum Bruch belastet. Unabhängig von den in der Haftschrift eingesetzten Haftvermittlern kam es bei allen Proben in der Probenmitte (vgl. Abb. 3.1) zum Versagen innerhalb der Haftschrift. Der Kohäsionsbruchanteil lag zum Teil über 80%. Abbildung 4.2 zeigt einen Kohäsionsbruch bei 1.000facher Vergrößerung.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 zusammengefaßt.

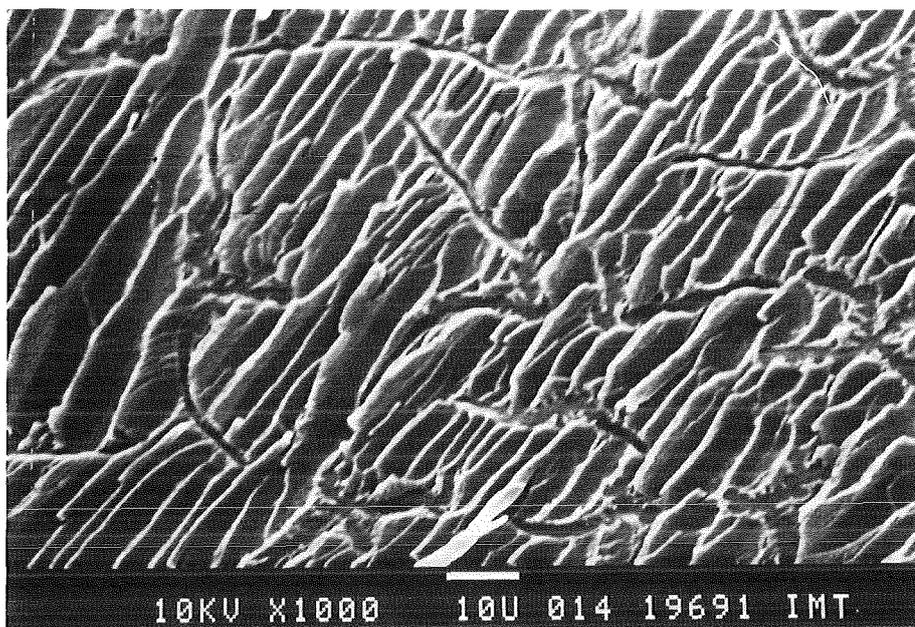


Abb. 4.2: Kohäsionsbruch einer PMMA-Haftschrift (Zugfestigkeit ca. 70 MPa) bei 1000facher Vergrößerung. Zusammensetzung der Haftschrift: 80 Gew. Teile Plexit 60, 20 Gew. Teile MMA, 2 Gew. Teile BPO, 1 Gew. Teil DMA. Als Haftvermittler wurde MEMO (1 Gew. Teil) eingesetzt.

Haftvermittlerkonzentration	MEMO	HEMA	HEMA-Phospat
1 Gew. Teil	49 MPa ± 9 MPa	31 MPa ± 4 MPa	41 MPa ± 6 MPa
3 Gew. Teile	41 MPa ± 10 MPa	31 MPa ± 8 MPa	37 MPa ± 6 MPa

Tab. 4.1: Zugfestigkeit der Verbindung Haftschrift/TiO_x bei 23 °C. Zusammensetzung der Haftschrift: 80 Gew. Teile Plexit 60, 20 Gew. Teile MMA, 2 Gew. Teile BPO, 1 Gew. Teil DMA. Die Konzentration des Haftvermittlers wurde variiert.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß auf der TiO_x-Oberfläche¹¹⁾ mit einer Haftschrift mit MEMO als Haftvermittler die beste Haftung erzielt wird. Bei einer Haftschrift mit 1 Gew. Teil MEMO ergab sich eine durchschnittliche Zugfestigkeit der Verbindung von 49 MPa. Die entsprechenden Werte mit 1 Gew. Teil HEMA-Phosphat bzw. HEMA liegen mit 41 MPa bzw. 31 MPa darunter. Da bei den internen Haftvermittlern die Verbesserung der Haftung auf eine chemische Reaktion des Haftvermittlers mit der Substratoberfläche zurückgeführt wird, ist die Ursache für die unterschiedlich gute Haftung im unterschiedlichen Molekulaufbau der Haftvermittler zu suchen /20/.

11) Herstellung der TiO_x-Schicht wird in /7/ beschrieben.

Eine Erhöhung des Haftvermittleranteils von 1 Gew. Teil auf 3 Gew. Teile führte beim MEMO und beim HEMA-Phosphat zu einer Verringerung der Zugfestigkeit. Im Gegensatz dazu ergaben sich beim HEMA bei 1 Gew. Teil und 3 Gew. Teilen Haftvermittler keine Unterschiede der mittleren Zugfestigkeit der Verbindung.

Bei den bisher vorgestellten Ergebnissen wurde die Zugfestigkeit der Verbindung Haftschrift/TiO_x einen Tag nach dem Aufpolymerisieren der Haftschrift bestimmt. Untersuchungen zur Alterung der Verbindung Haftschrift/TiO_x ergaben, daß bei einer Haftschrift mit 1 Teil HEMA die Zugfestigkeit mit zunehmender Lagerzeit abnimmt. Die Zugfestigkeit der an Luft gelagerten Proben fiel von 31 MPa (1 Tag) auf 23 MPa (8 Tage) ab und lag nach 17 Tagen unter 1 MPa. Bei den Haftschriften mit MEMO bzw. HEMA-Phosphat als Haftvermittler lagen die Meßergebnisse nach 8 Tagen innerhalb der Standardabweichungen der Meßergebnisse nach 1 Tag. Für die Abformung von Mikrostrukturen auf einer TiO_x-Oberfläche sind MEMO oder HEMA-Phosphat als Haftvermittler in der Haftschrift geeignet. Bei der Verwendung von HEMA als Haftvermittler sollten die Mikrostrukturen maximal 1 Woche nach dem Aufpolymerisieren der Haftschrift abgeformt werden.

An allen Proben wurden in der Probenmitte praktisch ausschließlich Kohäsionsbrüche festgestellt, d. h. die Zugfestigkeit von PMMA (ca. 70 MPa) wurde überschritten. Das bedeutet, daß auch sehr kleine Mikrostrukturen so gut auf einer TiO_x-Schicht haften, daß die Mikrostrukturen bei der Entformung eher zerreißen als sich von der TiO_x-Schicht zu lösen. Dies hat sich bei Mikrostrukturen mit lateralen Abmessungen von wenigen µm bestätigt, die unter nicht idealen Bedingungen abgeformt wurden.

Am Probenrand gab es Bereiche, in denen die Trennung zwischen der TiO_x-Schicht und der Haftschrift stattfand. Ein solcher Adhäsionsbruch ist in Abbildung 4.3 zu sehen. Auf der unteren Bildhälfte ist die TiO_x-Oberfläche zu sehen, darüber befindet sich die ca. 10 µm dicke Haftschrift auf deren Oberseite noch der Abdruck der zweiten TiO_x-Oberfläche zu sehen ist (vgl. Kap. 3.1.2).

Am Probenrand wurden Adhäsionsbrüche und Stellen ohne Benetzung sowie Fließmuster beobachtet, die während der Polymerisation entstanden sind. Ursache hierfür könnte der vom Probenzentrum zum Probenrand hin abfallende Druck sein, der während der Polymerisation auf die noch flüssige Haftschrift aufgebracht wurde. Die im Randbereich der Proben vorhandenen Fehler haben zu einer Herabsetzung der Zugfestigkeit der Verbindung TiO_x/Haftschrift und zu einer Erhöhung der Meßwertstreuung geführt.

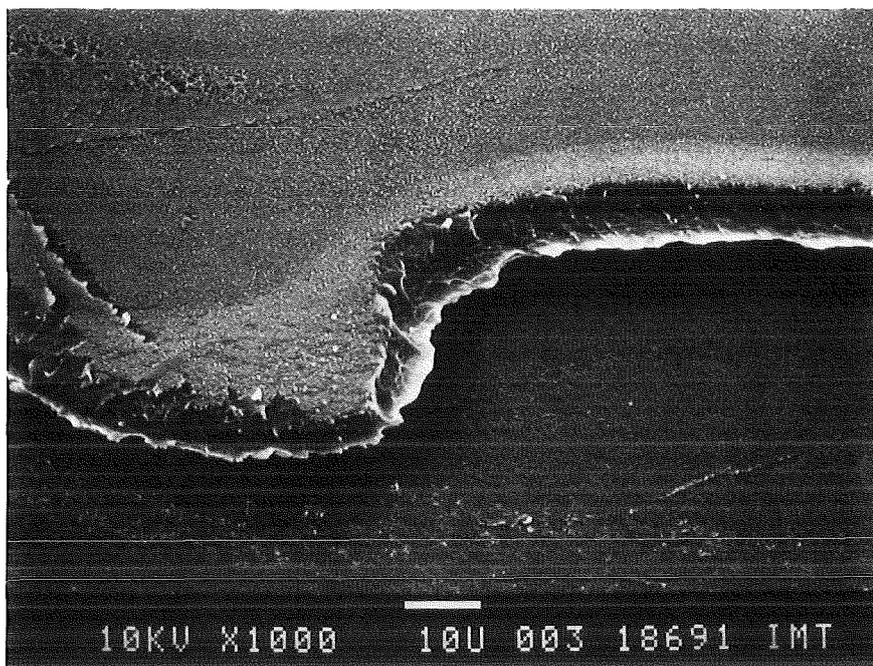


Abb. 4.3: Adhäsionsbruch einer PMMA-Haftschrift auf TiO_x bei 1000facher Vergrößerung. In der oberen Bildhälfte ist die ca. $10\ \mu\text{m}$ dicke Haftschrift zu sehen, unten die Oberfläche der TiO_x -Schicht. Die Trennung erfolgte zwischen TiO_x und Haftschrift. Zusammensetzung der Haftschrift: 80 Gew. Teile Plexit 60, 20 Gew. Teile MMA, 2 Gew. Teile BPO, 1 Gew. Teil DMA. Als Haftvermittler wurde MEMO (1 Gew. Teil) eingesetzt.

Um bei der Abformung von Mikrostrukturen Adhäsionsbrüche der Haftschrift zu vermeiden, wurde diese über eine größere Fläche aufpolymerisiert, als für die Abformung der Mikrostrukturen notwendig wäre. Durch das großflächige Aufpolymerisieren wurde auf den prozessierten Wafern eine gleichmäßige Haftschrift ohne Fließmuster erreicht. Bei der Entformung der Mikrostrukturen hat sich in keinem Fall die Haftschrift von der TiO_x -Schicht gelöst.

4.1.2 Haftschriften für Silizium-Wafer und Stahlsubstrate

Für die Abformung von Mikrostrukturen auf Si-Wafern ohne TiO_x -Beschichtung und auf Stahl- oder Invarsubstraten, die zur Bestimmung der Entformkraft eingesetzt wurden (vgl. Kap. 4.3.2), mußten ebenfalls geeignete Haftschriften entwickelt werden. Aufgrund der unterschiedlichen molekularen Endgruppen der Haftvermittler sind diese unterschiedlich gut für verschiedene Substratoberflächen geeignet /20/. Die Eignung der Haftvermittler auf Si-Wafern mit einer Si-, SiO_2 - oder Si_3N_4 -Oberfläche und auf Stahl- oder Invarsubstraten wurde direkt durch die Abformung von Mikrostrukturen auf den jeweiligen Substraten untersucht. Hierfür wurden Haftschriften mit 1 Gew. Teil Haftvermittler - MEMO, HEMA oder HEMA-Phosphat - eingesetzt. Aufgrund der Ergebnisse aus den

Haftungsuntersuchungen auf der TiO_x -Schicht wurde die Haftschrift großflächig auf die Substrate aufpolymerisiert.

Für die Abformung von Mikrostrukturen auf Si-Wafern bzw. Stahl- und Invarsubstraten sind Haftschriften mit HEMA (Si) bzw. HEMA-Phosphat (Stahl und Invar) als Haftvermittler geeignet¹²⁾. Es wurde experimentell gezeigt, daß sich mit diesen Haftschriften Entformkräfte von mehr als 2 kN¹³⁾ auf das jeweilige Substrat übertragen lassen. Die Mikrostrukturen wurden in keinem Fall vom Substrat gerissen. Im Gegensatz zu den Untersuchungen der Verbindung TiO_x -Haftschrift, die bis zum Versagen belastet wurde, wurden bei der Abformung von Mikrostrukturen auf Si-Wafern bzw. Stahl- und Invarsubstraten die Mikrostrukturen bei einer Zugkraft entformt, die in jedem Fall kleiner als die Zugfestigkeit der Verbindung Substrat-Haftschrift-Mikrostruktur war. Aus diesem Grund liegt die Zugspannung, bei der Verbindung Substrat-Haftschrift versagt, deutlich über den gemessenen 5 MPa.

Während auf prozessierten Wafern mit einer Si-, SiO_2 - oder Si_3N_4 -Oberfläche nur mit der HEMA-Haftschrift gute Ergebnisse erzielt wurden, können auf den mit TiO_x beschichteten Wafern sowohl MEMO-, HEMA-Phosphat- als auch HEMA-Haftschriften eingesetzt werden.

Damit stehen für die Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern eingesetzte Haftschriften zur Verfügung. Im Gegensatz zu den MEMO- und HEMA-Phosphat-Haftschriften läßt sich die HEMA-Haftschrift in Ethylacetat selektiv gegenüber dem prozessierten Wafer und den Mikrostrukturen aus Metall auflösen. Allerdings nimmt die Haftung der HEMA-Haftschrift auf der Waferoberfläche mit der Zeit ab (vgl. Kap. 4.4.1), so daß die Mikrostrukturen möglichst innerhalb einer Woche nach dem Aufpolymerisieren der Haftschrift abgeformt werden sollten.

Auf die Haftschrift wird der eigentliche Formstoff aufpolymerisiert.

12) Mit anderen als den oben aufgeführten Haftvermittlern wurde auf Si-Wafern bzw. Stahl- und Invarsubstraten nur eine unzureichende Festigkeit der Haftschrift auf dem jeweiligen Substrat erreicht.

13) Die Entformkraft von 2 kN ist rund viermal so groß wie die minimale Entformkraft, die unter optimierten Abformbedingungen (vgl. Kap. 4.3.3) zur Entformung der Mikrostrukturen notwendig ist. Eine Entformkraft von 2 kN führt zu einer Zugbeanspruchung der Haftschrift von ca. 5 MPa .

4.2 Materialeigenschaften des Formstoffes

Beim Prägen wird der Formstoff durch Eindrücken des Formeinsatzes strukturiert. Der Formstoff zeichnet sich dadurch aus, daß seine Viskosität bei der Prägtemperatur von 165 °C die Befüllung von Formnestern mit lateralen Abmessungen im Mikrometerbereich ermöglicht und er bei Raumtemperatur eine hohe Festigkeit besitzt. Um die Parameter für eine Abformung von fehlerfreien Mikrostrukturen zu ermitteln, wurden verschiedene Werkstoffeigenschaften des Formstoffes bestimmt. Die Versuchsergebnisse sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

4.2.1 Speichermodul und Übergangstemperaturen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Speichermodul E' , der bei einer Verformung den elastischen Anteil kennzeichnet, von Formstoffen mit unterschiedlichen Trennmittelanteilen in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt (vgl. Kap. 3.2.1). Aus dem Speichermodul E' und dem Dämpfungsfaktor $\tan \delta$ lassen sich die Übergangstemperaturen bestimmen, bei denen sich das Materialverhalten des Formstoffes ändert.

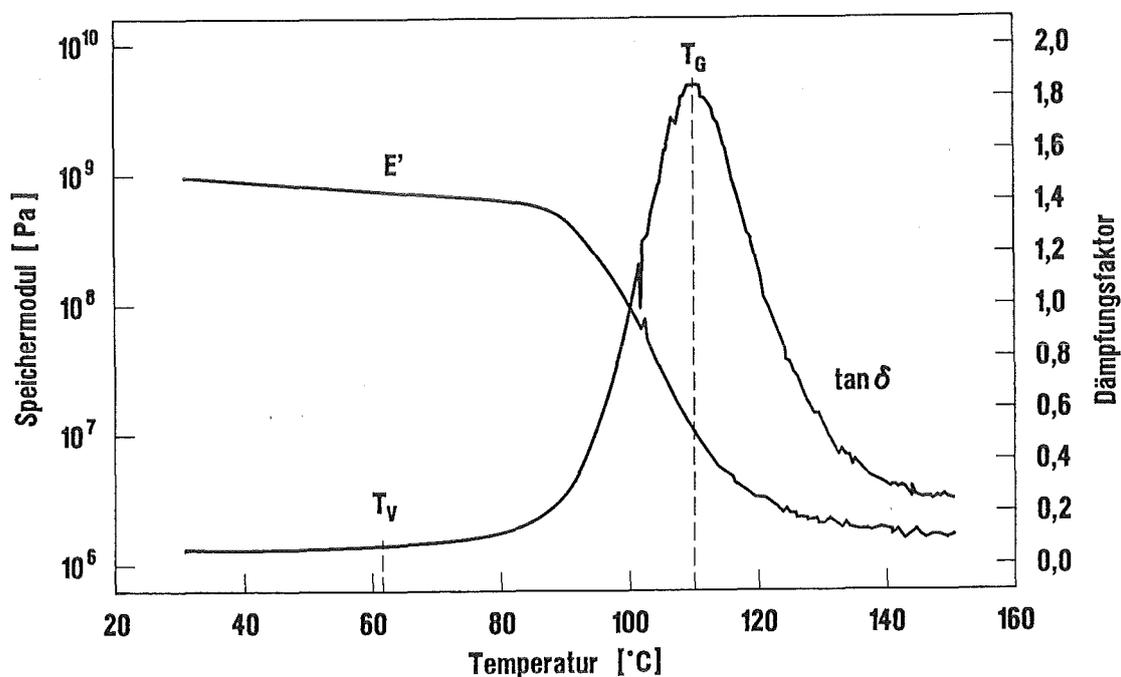


Abb. 4.4: Speichermodul E' und Dämpfungsfaktor $\tan \delta$ des Formstoffes mit 3 Gew. Teilen Trennmittel (Tab. 3.1, d) in Abhängigkeit von der Temperatur. Der Formstoff zeigt unterhalb der Versprödungstemperatur T_V ein Sprödbbruchverhalten und befindet sich bis zur Erweichungstemperatur T_E im hartelastischen Glaszustand. Oberhalb der Glasübergangstemperatur T_G befindet sich der Formstoff im viskoelastischen Zustand.

In Abbildung 4.4 sind von einem Formstoff mit 3 Gew. Teilen Trennmittel (Tab. 3.1, d) der Speichermodul und der Dämpfungsfaktor über der Temperatur aufgetragen. Der Dämpfungsfaktor des Formstoffes ist bis zu einer Temperatur von ca. 60 °C nahezu konstant. Aus dem Beginn der Zunahme des Dämpfungsfaktors wurde die Versprödungstemperatur T_V des Formstoffes bestimmt, die das Ende des elastischen Bereiches kennzeichnet. Bei einer weiteren Temperaturerhöhung beginnt der Formstoff zu erweichen. Die Erweichungstemperatur T_E , die das Ende des hartelastischen Bereichs angibt, wird durch die starke Abnahme des Speichermoduls bei ca. 80 °C gekennzeichnet. Mit zunehmender Temperatur nimmt der Dämpfungsfaktor zunächst stark zu. Aus dessen Maximum wird die Glasübergangstemperatur T_G bestimmt, bei der der Formstoff in den viskoelastischen Zustand übergeht. Dieser Übergang findet allerdings nicht abrupt statt, sondern vollzieht sich über einen Temperaturbereich von ca. 80 °C bis 115 °C.

Sowohl die Versprödungstemperatur T_V als auch die Erweichungstemperatur T_E stimmen gut mit den aus den Zugversuchen ermittelten Übergangstemperaturen überein (Kap. 4.2.4).

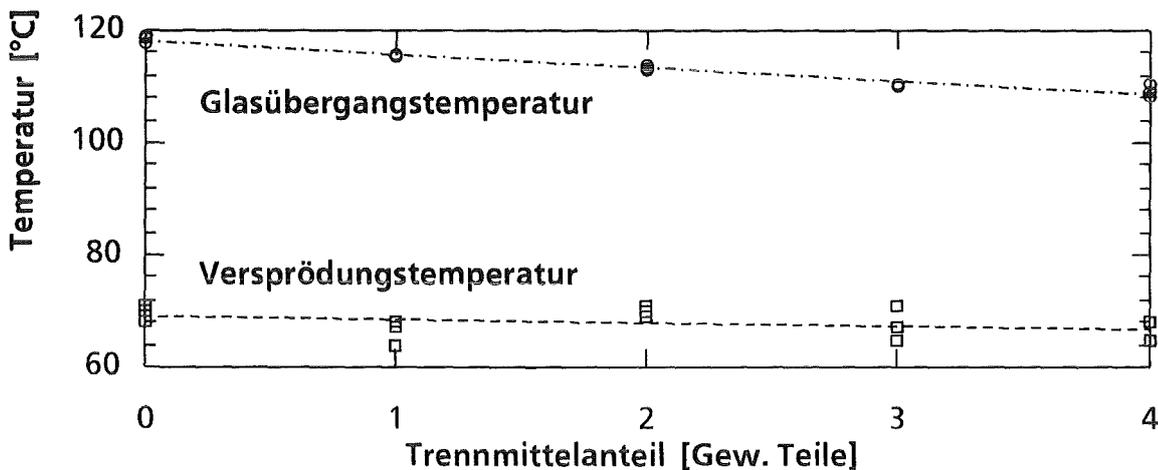


Abb. 4.5: Glasübergangstemperatur und Versprödungstemperatur des Formstoffes in Abhängigkeit vom Trennmittelanteil (Zusammensetzung siehe Tab. 3.1, a - e).

In Abbildung 4.5 sind die Glasübergangstemperatur T_G und die Versprödungstemperatur T_V über dem Trennmittelanteil des Formstoffes aufgetragen. Beim Formstoff ohne Trennmittel beträgt die Glasübergangstemperatur 118 °C. Durch die Zugabe des Trennmittels zum Formstoff verringert sich dieser Wert pro Gew. Teil Trennmittel um ca. 2 K und erreicht bei 4 Gew. Teilen Trennmittel einen Wert von 109 °C.

Im Gegensatz zur Glasübergangstemperatur liegt die Versprödungstemperatur nahezu unabhängig vom Trennmittelanteil im Formstoff knapp unter 65 °C.

Da sich mit der Dynamisch Mechanischen Thermoanalyse (DMTA, vgl. Kap. 3.2.1) sowohl die Glasübergangstemperatur als auch die Versprödungstemperatur von amorphen Polymeren bestimmen läßt, eignet sich diese Methode zur Charakterisierung von Formstoffen. Aus den Übergangstemperaturen und dem Verlauf des Speichermoduls können erste Anhaltswerte für die Abformung von Mikrostrukturen gewonnen werden. Die Prägetemperatur (vgl. Kap. 4.2.2) sollte über der Glasübergangstemperatur (112 °C) des Formstoffes liegen und die Mikrostrukturen unterhalb der Versprödungstemperatur (ca. 60 °C) entformt werden (vgl. Kap. 4.2.4). Bei Formstoffen, die zum Prägen eingesetzt werden, ist ein steiler Abfall des Speichermoduls von Vorteil, da hierdurch eine starke temperaturbedingte Änderung der Materialeigenschaften des Formstoffes angezeigt wird. Dadurch wird eine geringe Temperaturdifferenz zwischen Präge- und Entformtemperatur ermöglicht, und damit ergeben sich kurze Zeiten für die Aufheizung und Abkühlung von Formeinsatz und Substrat.

4.2.2 Dynamische Viskosität der Formmasse

Bei einer Temperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur des Formstoffes befindet sich dieser im viskoelastischen Zustand. Im viskoelastischen Zustand kann der Formstoff durch Eindringen des Formeinsatzes strukturiert werden und wird deshalb als Formmasse bezeichnet. Beim Prägen hängt die Befüllung des Formeinsatzes mit Formmasse ganz entscheidend von der Viskosität der Formmasse ab. Zur Bestimmung der dynamischen Viskosität wurden mit der DMTA-Apparatur Speicher- und Verlustmodul der Formmasse bestimmt (vgl. Kap. 3.2.1) und daraus die Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt. Parallel dazu wurde oberhalb der Glasübergangstemperatur die dynamische Viskosität aus der Verdrängung der Formmasse zwischen zwei Platten und der daraus resultierenden Änderung des Plattenabstands bestimmt (vgl. Kap. 3.2.2).

Bei Formmassen mit bis zu 4 Gew. Teilen Trennmittel wurde kein Einfluß des Trennmittelanteils auf die dynamische Viskosität der Formmasse festgestellt. In Abbildung 4.6 ist die dynamische Viskosität einer Formmasse mit 3 Gew. Teilen Trennmittel (Tab. 3.1, d) in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Die Viskositätswerte, die aus der Verdrängung der Formmasse zwischen zwei Platten (vgl. Kap. 3.2.2) bestimmt wurden, stimmen gut mit denen überein, die mit der DMTA-Apparatur ermittelten wurden. Bis zu einer Temperatur von ca. 80 °C befindet sich der Formstoff im hartelastischen Glaszustand (vgl. Abb. 4.3). Oberhalb von 80 °C beginnt der Formstoff zu erweichen. Zwischen 115 °C und 165 °C nimmt der Viskositätswert der Formmasse um ca. 2 Größenordnungen ab.

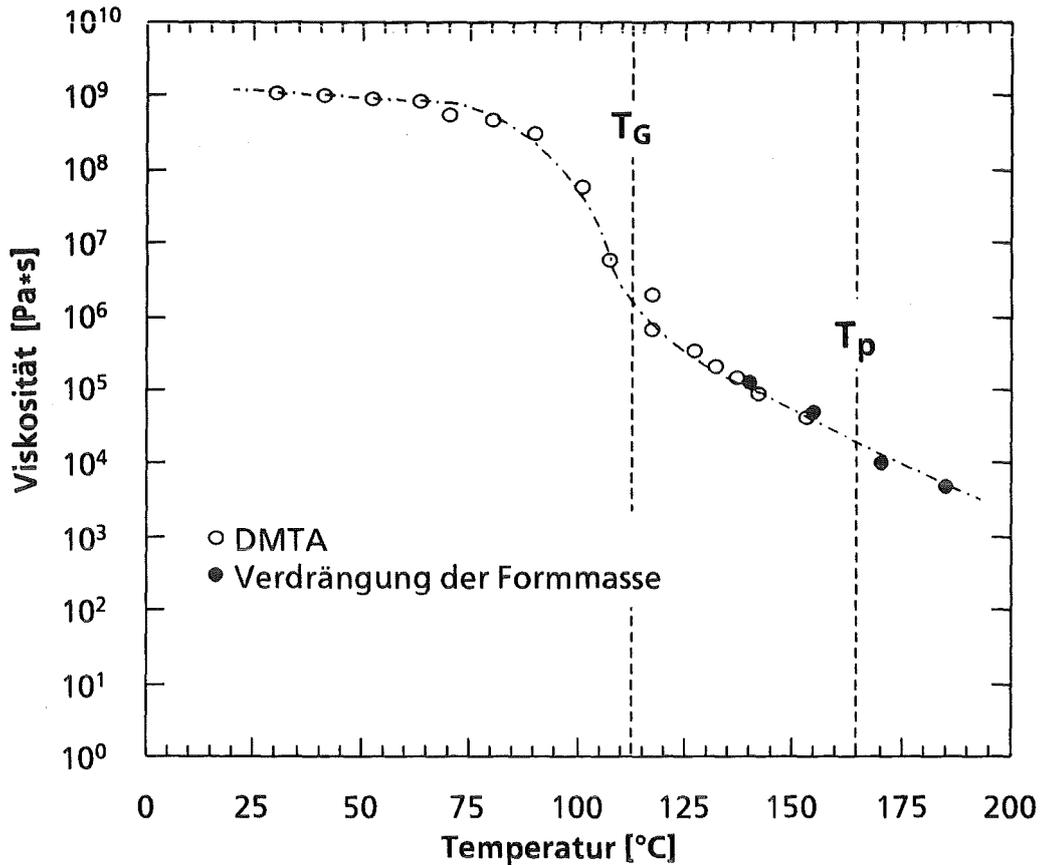


Abb. 4.6: Logarithmische Auftragung der Viskosität der Formmasse mit 3 Gew. Teilen Trennmittel (Tab. 3.1, d) über der Temperatur. Die Viskosität wurde aus der Verdrängung der Formmasse zwischen zwei Platten sowie aus dem Speicher- und dem Verlustmodul bestimmt, der mit der DMTA ermittelt wurde. Die Prägetemperatur T_p der Formmasse liegt ca. 50 K über deren Glasübergangstemperatur T_G .

Beim Prägen hängt die Befüllung des Formeinsatzes mit Formmasse neben der Viskosität der Formmasse auch von der Prägekraft und den lateralen Abmessungen der Formnester ab (vgl. Kap. 2.2). Die Untersuchungen der Formmasse zeigen, daß die Viskosität der Formmasse mit zunehmender Temperatur stark abnimmt. Deshalb läßt sich durch eine Erhöhung der Prägetemperatur die Prägekraft und damit gleichzeitig die mechanische Belastung von Formeinsatz und Substrat verringern. Andererseits erhöht sich mit zunehmender Prägetemperatur auch die zum Aufheizen und Abkühlen notwendige Zeit.

Um den Formeinsatz nicht zu stark mechanisch zu belasten und auch Formnester mit lateralen Abmessungen im μm -Bereich beim Prägen vollständig mit Formmasse zu befüllen, wurde die Formmasse bei einer Prägetemperatur T_p von 165 °C strukturiert. Bei dieser Temperatur beträgt die dynamische Viskosität der Formmasse rund 20.000 Pa*s.

4.2.3 Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Formstoffes

Durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Formstoff und Formeinsatz können bei der Abkühlung die Spannungen in den Mikrostrukturen je nach Mikrostrukturgeometrie zu- oder abnehmen (vgl. Kap. 2.3).

In Abbildung 4.7 ist der thermische Ausdehnungskoeffizient von Formstoffen mit von 0 bis 4 Gew. Teilen Trennmittel über der Temperatur aufgetragen.

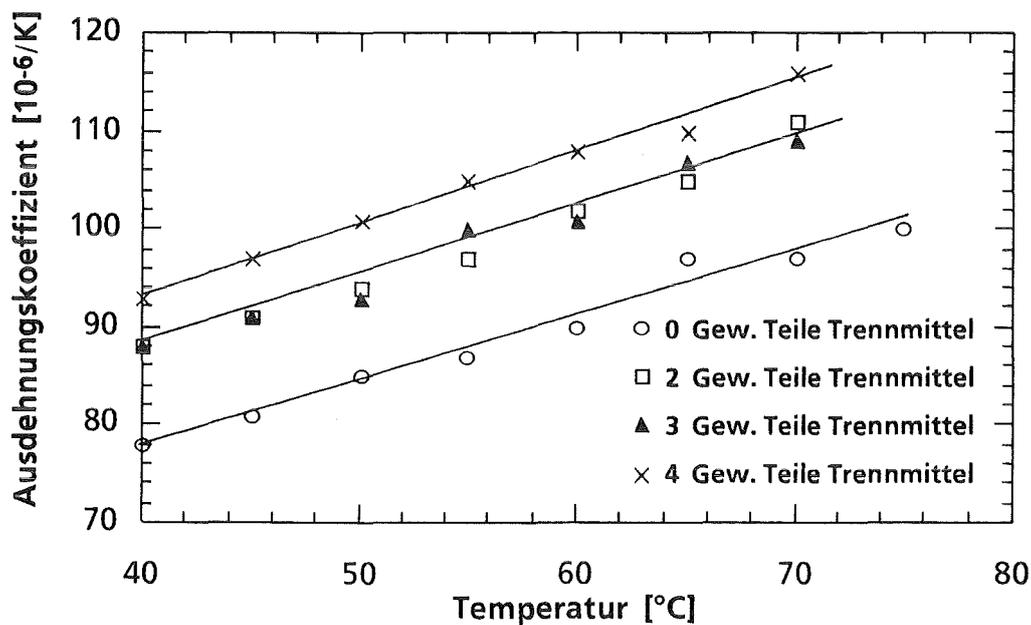


Abb. 4.7: Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Formstoffes mit 0 bis 4 Gew. Teilen Trennmittel. Zusammensetzung des Formstoffes siehe Tab. 3.1, a, c, d und e.

Der geringste thermische Ausdehnungskoeffizient wurde beim Formstoff ohne Trennmittel gemessen. Bei einer Temperatur von 40 °C ergab sich ein Wert von $78 \cdot 10^{-6}/K$. Der thermische Ausdehnungskoeffizient bei 70 °C beträgt $98 \cdot 10^{-6}/K$ und nimmt mit zunehmendem Trennmittelgehalt auf $116 \cdot 10^{-6}/K$ (4 Gew. Teile) zu. Pro Gew. Teil Trennmittel nimmt der thermische Ausdehnungskoeffizient des Formstoffes zwischen 40 °C und 70 °C um ca. $4 \cdot 10^{-6}/K$ zu. Bei den Formstoffen mit 3 bzw. 4 Gew. Teilen Trennmittel lagen die thermischen Ausdehnungskoeffizienten bei 40 °C bei $87 \cdot 10^{-6}/K$ bzw. $93 \cdot 10^{-6}/K$. Mit zunehmender Temperatur nimmt der thermische Ausdehnungskoeffizient alle 10 K um ca. $7 \cdot 10^{-6}/K$ zu.

Da die Mikrostrukturen aus Formstoff vor der Entformung von der Prägetemperatur auf die Entformtemperatur abgekühlt werden, ist für die Maßhaltigkeit im allgemeinen ein geringer thermischer Ausdehnungskoeffizient von Vorteil /18/. Durch die Abformung auf Substraten, die einen deutlich niedrigeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als der Formstoff besitzen, z. B. Si-Wafer

oder Stahlsubstrate, wird durch eine geringe Dicke der Restschicht¹⁴⁾ eine sehr gute Maßhaltigkeit erreicht, so daß sich in diesem Fall der hohe thermische Ausdehnungskoeffizient des Formstoffes nicht bemerkbar macht. Weil sich die Mikrostrukturen aus Formstoff, z. B. Wabenprismen, bei der Abkühlung stärker zusammenziehen als der sie umgebende Formeinsatz, verringert sich die zur Entformung der Mikrostrukturen notwendige Entformkraft (vgl. Kap. 4.3.2). Deshalb ist ein großer thermischer Ausdehnungskoeffizient von Vorteil. Da die Maßhaltigkeit der Mikrostrukturen durch Maßvorhalt im Formeinsatz gewährleistet werden kann, wurde die Minimierung der Entformkraft angestrebt und beim Prägen ein Formstoff mit höherem Trennmittelanteil eingesetzt.

4.2.4 Eigenschaften des Formstoffes bei Zugbeanspruchung

Die zur Entformung der Mikrostrukturen notwendige Entformkraft wird durch die zwischen Formeinsatz und den Mikrostrukturen auftretende Haftung/Reibung bestimmt. Die hierbei in den Mikrostrukturen auftretenden Zugspannungen dürfen jedoch nicht die 0,2 %-Dehnspannung bzw. die Zugfestigkeit des Formstoffes überschreiten, da sonst die Mikrostrukturen plastisch verformt werden bzw. abreißen.

Um die bei der Entformung auftretenden Spannungen mit der Zugfestigkeit des Formstoffes vergleichen zu können, wurden die Werkstoffkennwerte des Formstoffes bei Zugbeanspruchung in Abhängigkeit von der Temperatur, dem Trennmittelanteil und dem Initiatoranteil bestimmt.

Mit einer Zugprüfmaschine wurden die Zugfestigkeit, die 0,2 %-Dehnspannung, der Elastizitätsmodul und die Reißdehnung des Formstoffes bestimmt. Die Prüfungsgeschwindigkeit entspricht mit 2 mm/s der Entformgeschwindigkeit, mit der die Mikrostrukturen bei der Laboranlage RIM 3 entformt werden.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse vorgestellt.

Einfluß der Temperatur auf die Werkstoffeigenschaften

Bei einem Formstoff mit 3 Gew. Teilen Trennmittel (Tab. 3.1, d) wurde der Einfluß der Temperatur auf die Werkstoffkennwerte zwischen Raumtemperatur und 100 °C bestimmt. In Abbildung 4.8 sind der Elastizitätsmodul E , die Zugfestigkeit σ_B , die 0,2 %-Dehnspannung $\sigma_{50,2}$ und die Reißdehnung ϵ_R über der Temperatur aufgetragen. Zwischen Raumtemperatur und ca. 60 °C nehmen der Elastizitätsmodul, die Zugfestigkeit und die 0,2 %-Dehnspannung mit zunehmender

14) Bei der Abformung auf Si-Wafern lag die Restschichtdicke zwischen 10 µm und 35 µm.

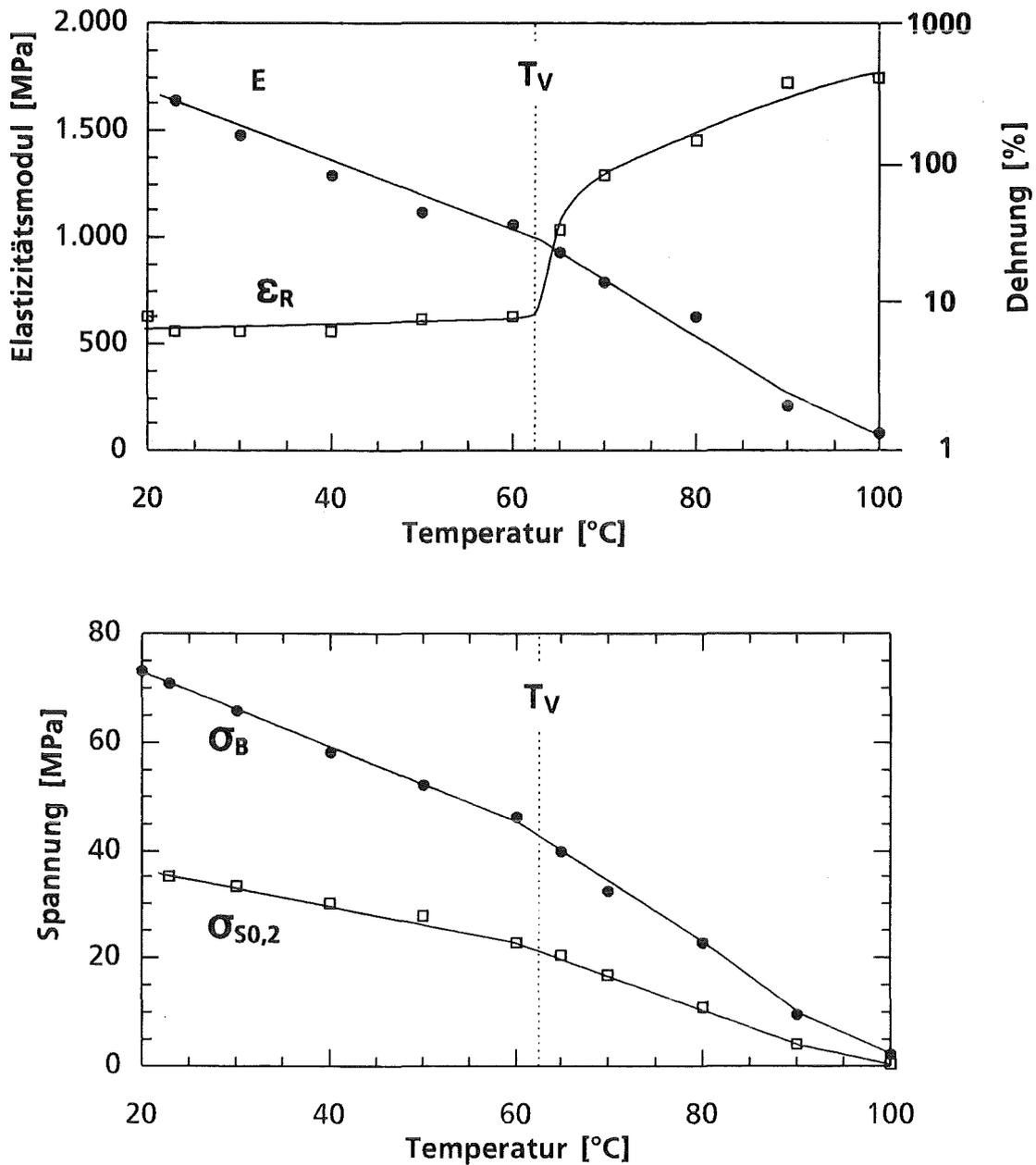


Abb. 4.8: Einfluß der Temperatur auf den Elastizitätsmodul E , die Reißdehnung ϵ_R , die Zugfestigkeit σ_B und die 0,2%-Dehnspannung $\sigma_{50,2}$ des Formstoffes mit 3 Gew. Teilen Trennmittel (Tab.3.1, d). Oberhalb der Versprödungstemperatur T_v zeigt der Formstoff ein duktilen Bruchverhalten.

Temperatur gleichmäßig ab. Oberhalb von 60 °C ist die Abnahme größer. Die Reißdehnung ist zwischen Raumtemperatur und 60 °C fast konstant und nimmt oberhalb von 60 °C sehr stark zu.

Der Grund für die plötzliche Zunahme der Reißdehnung liegt im Übergang vom spröden zum duktilen Bruchverhalten des Formstoffes. Dies wird bei der Betrachtung der entsprechenden Spannungs-Dehnungs-Kurven deutlich. In Abbildung 4.9 sind auf der linken Seite die Spannungs-Dehnungs-Kurven bei 23 °C, 40 °C und 60 °C und auf der rechten Seite bei 65 °C und 70 °C aufgetragen.

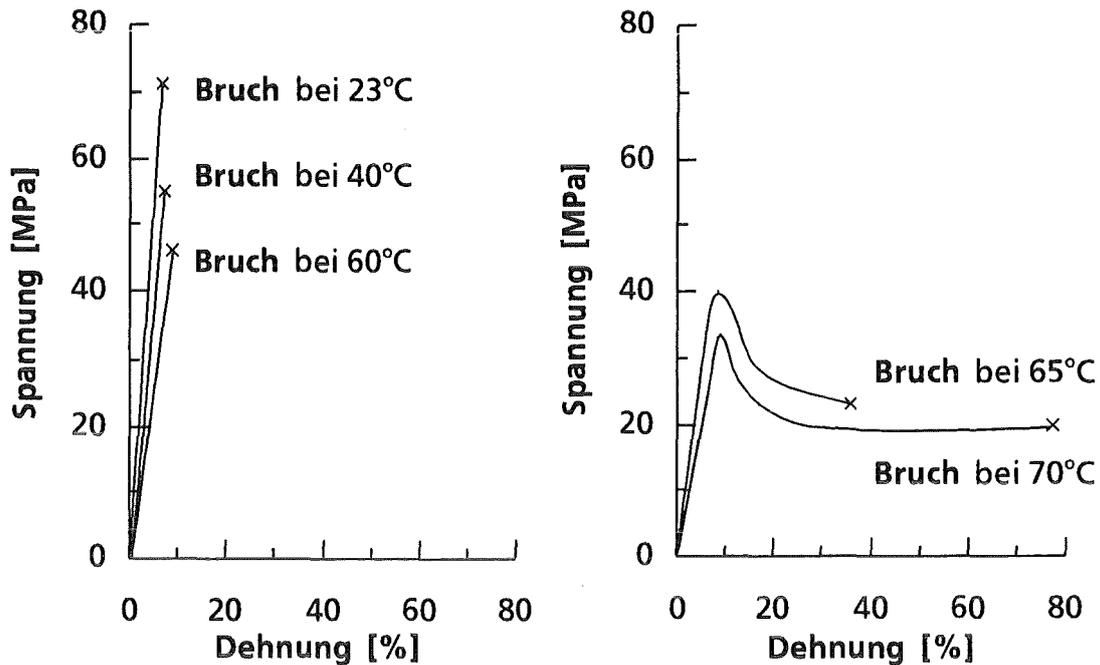


Abb. 4.9: Spannungs-Dehnungsverlauf des Formstoffes mit 3 Gew. Teilen Trennmittel (Tab. 3.1, d). Bei Temperaturen bis 60°C zeigt der Formstoff Sprödbbruchverhalten und ab 65°C duktiles Bruchverhalten.

Bei Temperaturen bis 60 °C traten im Formstoff bis zum Bruch fast keine plastischen Dehnungen auf. Die Zugproben zeigten ein reines Sprödbbruchverhalten mit einer Reißdehnung zwischen 7 % und 9 %. Ab einer Temperatur von 65 °C traten bei den Zugproben nach Überschreitung der maximalen Spannung (bezogen auf den Anfangsquerschnitt der Zugprobe) große plastische Dehnungen verbunden mit deutlichen Einschnürung auf. Die durchschnittliche Reißdehnung bei 65 °C lag bei 36 % und bei 70 °C bereits bei 77 %. Bei 100 °C wurden Reißdehnungen von über 400 % gemessen. Im Gegensatz hierzu lag die Dehnung bei der Höchstkraft bei Temperaturen bis 80 °C zwischen 7 % und 9 % und nahm erst bei 90 °C auf rund 400 % zu.

Anhand der Spannungs-Dehnungskurven konnte experimentell gezeigt werden, daß die Versprödungstemperatur (T_V) des Formstoffes, die den Übergang vom spröden zum duktilen Bruchverhalten kennzeichnet, zwischen 60 °C und 65 °C liegt (vgl. Kap. 4.2.1). Zwischen 80 °C und 90 °C nimmt die Dehnung bei Höchstkraft von 9 % auf rund 400 % zu, d. h. zwischen 80 °C und 90 °C liegt eine zweite Übergangstemperatur. Bei dieser Temperatur beginnt der Formstoff zu erweichen, d. h. die Übergangstemperatur kennzeichnet das Ende des hart-elastischen Glaszustands (vgl. Kap. 4.2.1).

Bei der Abformung von Mikrostrukturen mit großem Flächenverhältnis, wie z. B. den Beschleunigungssensor-Negativen (vgl. Kap. 3.3.2), besteht die Gefahr, daß die Mikrostrukturen bei der Entformung plastisch verformt werden. Da die

Festigkeit des Formstoffes mit abnehmender Temperatur zunimmt, sollte die Entformtemperatur möglichst gering sein und auf jeden Fall unter der Versprödungstemperatur (60 °C) liegen. Mikrostrukturen mit geringem Flächenverhältnis, z. B. 80 µm-Wabenprismen, können aufgrund ihrer großen Grundfläche auch oberhalb der Versprödungstemperatur entformt werden. Bei einer Entformtemperatur von 90 °C waren unter dem Rasterelektronenmikroskop keine plastischen Verformungen erkennbar.

Einfluß des Trennmittels auf die Werkstoffeigenschaften

Durch Zugabe eines internen Trennmittels wird die Haftung zwischen Formstoff und Formeinsatz verringert. Andererseits können durch die Zugabe des Trennmittels auch die Werkstoffeigenschaften des Formstoffes verändert werden. Aus diesem Grund wurden der Elastizitätsmodul (E), die Zugfestigkeit (σ_B), die 0,2 %-Dehnspannung ($\sigma_{50,2}$) und die Dehnung bei Höchstkraft (ϵ_B) des Formstoffes mit bis zu 4 Gew. Teilen Trennmittel zwischen Raumtemperatur und 70 °C bestimmt.

In Abbildung 4.10 ist der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit vom Trennmittelgehalt im Formstoff bei verschiedenen Temperaturen dargestellt. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichungen der Meßergebnisse dar.

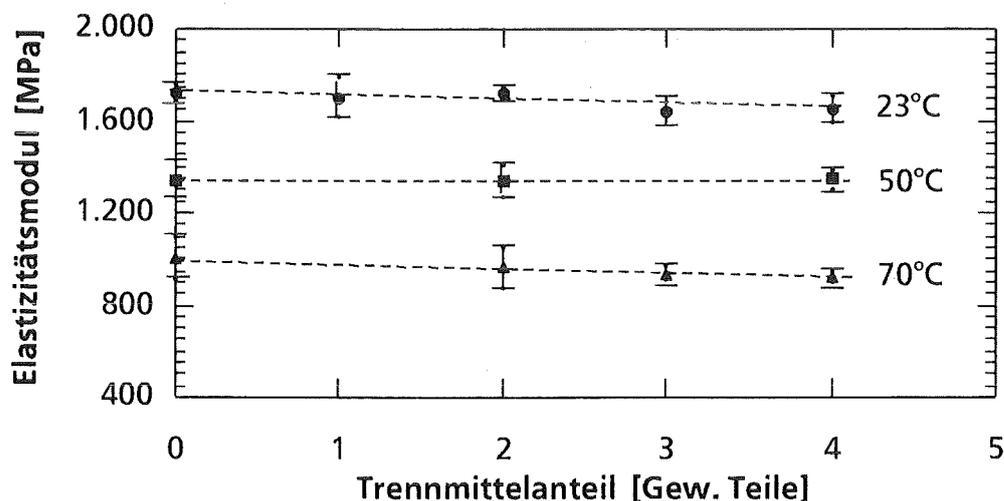


Abb. 4.10: Elastizitätsmodul des Formstoffes mit unterschiedlichen Trennmittelanteilen (Tab. 3.1, a - e) bei verschiedenen Temperaturen.

Bei 23 °C beträgt der Elastizitätsmodul des Formstoffes ohne Trennmittel 1.730 MPa. Durch die Zugabe von 2 bzw. 4 Gew. Teilen Trennmittel zum Formstoff ergaben sich mit 1.720 MPa bzw. 1.660 MPa nur geringfügig niedrigere Werte. Bei 50 °C lag der Elastizitätsmodul des Formstoffes mit 0 bis 4 Gew. Teilen Trennmittel bei rund 1.340 MPa. Bei einer Temperatur von 70 °C wurde ein

geringfügiger Einfluß des Trennmittels auf den Elastizitätsmodul des Formstoffes festgestellt, der jedoch noch innerhalb der Standardabweichungen der Meßergebnisse liegt. Beim Formstoff ohne Trennmittel lag der Elastizitätsmodul bei 70 °C bei 1.000 MPa und nahm mit zunehmendem Trennmittelgehalt im Formstoff auf 965 MPa (2 Gew. Teile) bzw. 920 MPa (4 Gew. Teile) ab. Die Standardabweichungen der Meßergebnisse der verschiedenen Versuche liegen zwischen 20 MPa und 90 MPa.

Die Dehnung des Formstoffes bei Höchstkraft liegt zwischen 6 % und 10 %. Aufgrund der relativ großen Streuung der Meßergebnisse¹⁵⁾ ist kein signifikanter Einfluß des Trennmittelgehalts im Formstoff bzw. der Temperatur auf die Dehnung erkennbar.

In Abbildung 4.11 sind die Zugfestigkeit und die 0,2 %-Dehnspannung des Formstoffes mit unterschiedlichen Trennmittelanteilen über der Temperatur aufgetragen.

Die Zugfestigkeit des Formstoffes mit 0 bis 4 Gew. Teilen Trennmittel liegt bei Raumtemperatur über 72 MPa und erreicht damit den in Literatur /17, 19, 22/ angegebenen Wert für unvernetztes PMMA. Bei 50 °C lag die Zugfestigkeit mit 2 bzw. 4 Gew. Teilen Trennmittel bei 59 MPa, während ohne Trennmittel 64 MPa erreicht wurden. Bei 70 °C zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Trennmittelanteil des Formstoffes. Mit zunehmendem Trennmittelanteil fiel die Zugfestigkeit von 45 MPa (0 Gew. Teile) auf 42 MPa (2 Gew. Teile) und 35 MPa (4 Gew. Teile) ab. Die Ursache für den deutlichen Einfluß des Trennmittels auf die Zugfestigkeit des Formstoffes bei 70 °C liegt im duktilen Bruchverhalten des Formstoffes, das erst bei der Versprödungstemperatur von ca. 65 °C auftritt (vgl. Abb. 4.9).

Die 0,2 %-Dehnspannung des Formstoffes darf bei der Entformung der Mikrostrukturen nicht überschritten werden, wenn eine plastische Verformung der Mikrostrukturen ausgeschlossen werden muß. Bei Raumtemperatur wurde beim Formstoff ohne Trennmittel eine 0,2 %-Dehnspannung von 41 MPa erreicht. Durch die Zugabe des Trennmittels verringert sich dieser Wert um ca. 1,5 MPa pro Gew. Teil Trennmittel. Bei 50 °C lag die 0,2 %-Dehnspannung beim Formstoff ohne Trennmittel bei 35 MPa und nahm ebenfalls um 1,5 MPa pro Gew. Teil Trennmittel ab. Bei 70 °C wurde unabhängig vom Trennmittelanteil eine 0,2 %-Dehnspannung von 22 MPa gemessen. Dies ist verständlich, da die 0,2 %-Dehnspannung den Beginn der plastischen Dehnung kennzeichnet und der Übergang vom elastischen zum plastischen Bruchverhalten zwischen 60 °C und 65 °C

15) Die Standardabweichungen der Dehnung liegen zwischen $\pm 0,3\%$ und $\pm 1,9\%$.

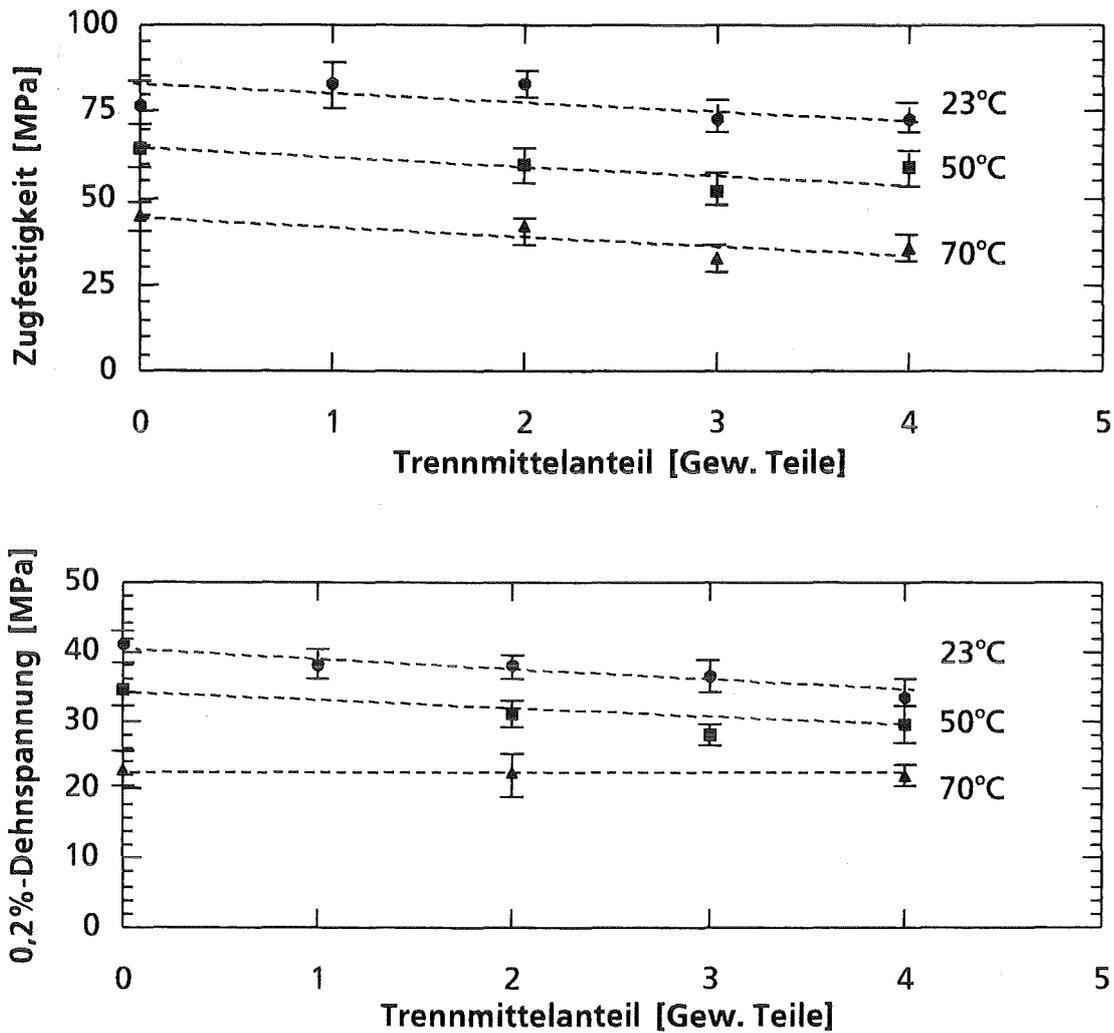


Abb. 4.11: Zugfestigkeit und 0,2%-Dehnspannung des Formstoffes mit unterschiedlichen Trennmittelanteilen (Tab. 3.1, a -e) bei 23°C, 50°C und 70°C.

stattfindet (vgl. Abb. 4.9). Bei 70 °C wird durch das veränderte Bruchverhalten beim Formstoff unabhängig vom Trennmittelgehalt der Beginn der plastischen Dehnung bei einer Zugspannung von rund 22 MPa erreicht.

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, daß durch die Zugabe von bis zu 4 Gew. Teilen Trennmittel der Elastizitätsmodul und die Dehnung des Formstoffes nur geringfügig verändert werden. Die Zugfestigkeit und die 0,2 %-Dehnspannung nehmen mit zunehmendem Trennmittelanteil ab. Im Vergleich hierzu macht sich der Einfluß der Temperatur deutlich stärker bemerkbar. Da durch das Trennmittel im Formstoff die Entformkraft und damit die Zugspannung in den Mikrostrukturen bei der Entformung sehr stark verringert wird und sich die Abnahme der Zugfestigkeit und der 0,2 %-Dehnspannung weniger stark bemerkbar macht, wurde der Trennmittelanteil im Hinblick auf eine minimale Entformkraft optimiert (vgl. Kap. 4.3.2).

Einfluß des Initiators und des Aktivators auf die Werkstoffeigenschaften

Durch den Initiatoranteil im Gießharz wird die Konzentration der Radikale zu Beginn der Polymerisation und damit die Polymerisationsgeschwindigkeit bestimmt. Gleichzeitig hängt das durchschnittliche Molekulargewicht des Formstoffes vom Initiatoranteil im Gießharz ab. Um zu überprüfen, ob die Werkstoffeigenschaften ebenfalls vom Molekulargewicht des Formstoffes abhängen und gegebenenfalls den Initiatoranteil entsprechend zu optimieren, wurde der Einfluß des Initiatoranteils auf die Zugeigenschaften des Formstoffes untersucht.

Der Einfluß des Initiators auf die Werkstoffkennwerte des Formstoffes ist in Abbildung 4.12 zusammengefaßt. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichungen der Meßergebnisse an.

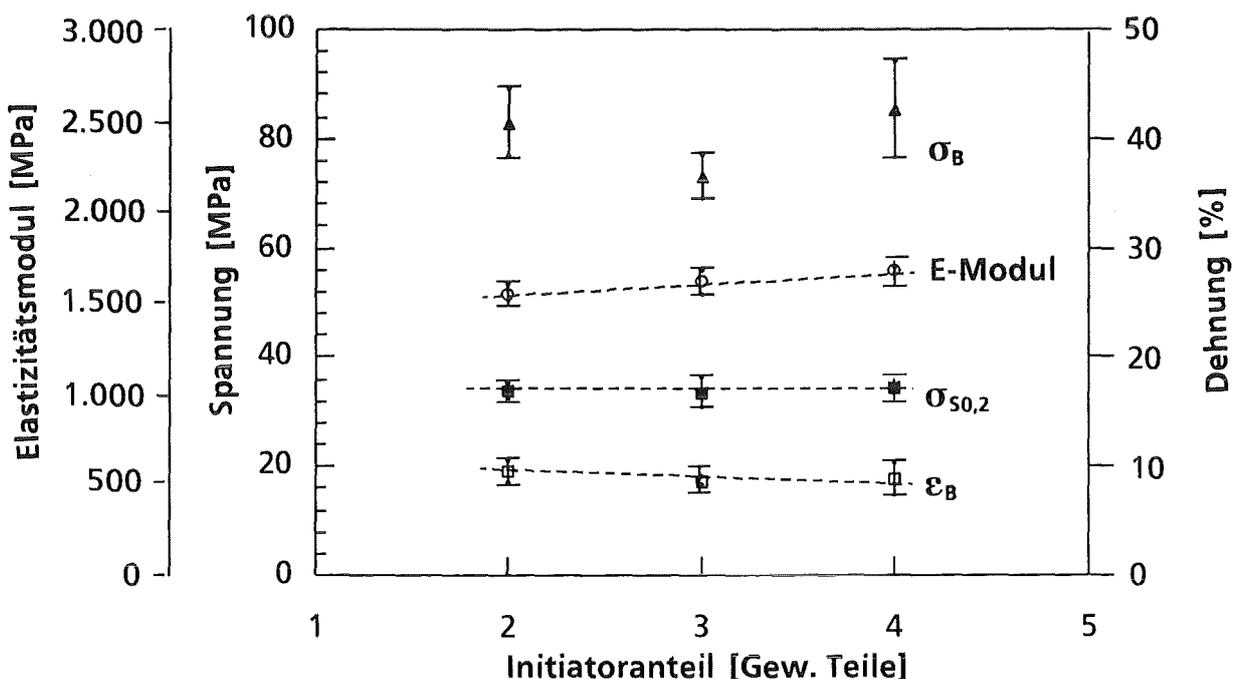


Abb. 4.12: Einfluß des Initiatoranteils im Formstoff mit 3 Gew. Teilen Trennmittel auf den Elastizitätsmodul E; die Zugfestigkeit σ_B , die 0,2 %-Dehnspannung $\sigma_{50,2}$ und die Dehnung bei Höchstkraft ϵ_B bei 23°C. Zusammensetzung des Formstoffes siehe Tab. 3.1, d, f und g.

Bei einem Formstoff mit 3 Gew. Teilen Trennmittel wurde der Initiatoranteil zwischen 2 und 4 Gew. Teilen variiert und das Verhältnis von Initiator (BPO) zu chemischem Aktivator (DMA) mit 2 zu 1 konstant gehalten. Die bei Raumtemperatur ermittelten Werkstoffkennwerte zeigen keine, bzw. nur eine geringfügige Abhängigkeit vom Initiatoranteil im Formstoff. Durch die Erhöhung von 2 auf 4 Gew. Teile Initiator nahm der Elastizitätsmodul des Formstoffes von

1.550 MPa auf 1.680 MPa zu und die Dehnung bei Höchstkraft von 9,5 % auf 8,8 % ab. Bei der Zugfestigkeit und der 0,2 %-Dehnspannung ergaben sich durch die Erhöhung des Initiators von 2 auf 4 Gew. Teile keine Veränderungen.

Da die Werkstoffkennwerte des Formstoffes nicht bzw. nur geringfügig vom Initiatoranteil abhängen und das gewichtete mittlere Molekulargewicht mit zunehmendem Initiatoranteil abnimmt /35/, besteht keine bzw. nur eine sehr geringe Abhängigkeit der Werkstoffkennwerte vom Molekulargewicht. Deshalb kann der Initiatoranteil je nach gewünschter Polymerisationszeit des Gießharzes gewählt werden.

4.3 Abformung von Mikrostrukturen

Nach den Untersuchungen von Haftschrift (Kap. 4.1) und Formstoff (Kap. 4.2) hinsichtlich der Haftung auf verschiedenen Substraten bzw. der Eignung beim Prägen, wurde die Optimierung des Abformprozesses durchgeführt.

Beim Prägen müssen zunächst die Formnester des Formeinsatzes vollständig mit Formmasse befüllt und anschließend die Mikrostrukturen ohne Schaden entformt werden. Die hierzu durchgeführten Untersuchungen werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

4.3.1 Befüllung des Formeinsatzes

Der Befüllungsgrad des Formeinsatzes hängt neben der dynamischen Viskosität der Formmasse (vgl. Kap. 4.2.2) ganz entscheidend von der Formnesttiefe und der minimalen lateralen Abmessung der Formnester ab (vgl. Kap. 2.2.2). Während bisher überwiegend Formeinsätze mit relativ großen Formnestern, z. B. der Wabenprismen-Formeinsatz (vgl. Kap. 3.3.2) mit einem Innenkreisdurchmesser von 80 μm bei der Abformung zum Einsatz kamen, wurde beim Prägen auch der Beschleunigungssensor-Formeinsatz mit 2 μm breiten Formnestern eingesetzt. Die mit dem Beschleunigungssensor-Formeinsatz durchgeführten experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, daß sich beim Prägen trotz der hohen Viskosität der Formmasse¹⁶⁾ auch Formnester mit einer minimalen Spaltbreite von 2 μm vollständig befüllen lassen.

16) Die dynamische Viskosität der Formmasse liegt bei der Umformtemperatur von 165°C bei rund 20.000 Pa*s (vgl. Abb. 4.6) und liegt damit rund 4 Größenordnungen über dem Viskositätswert der bisher zur Abformung eingesetzten Reaktionsgießharze.

Mit den Formeln 2.6, 2.11 und 2.12 wurde für typische Abformparameter¹⁷⁾ die Zeit berechnet, die zur vollständigen Befüllung der Formnester notwendig ist. Nach dieser Rechnung werden beim Prägen die Formnester des Wabenprismen-Formeinsatzes in weniger als einer Sekunde mit Formmasse befüllt. Dagegen sind für die Befüllung der 2 μm breiten Formnester ca. 20 Sekunden erforderlich.

Durch eine vorzeitige Unterbrechung des Prägevorgangs nach 10 s konnte die Fließfront der Formmasse während der Befüllung des Beschleunigungssensor-Formeinsatzes „eingefroren“ werden. In Abbildung 4.13 ist eine nur zum Teil

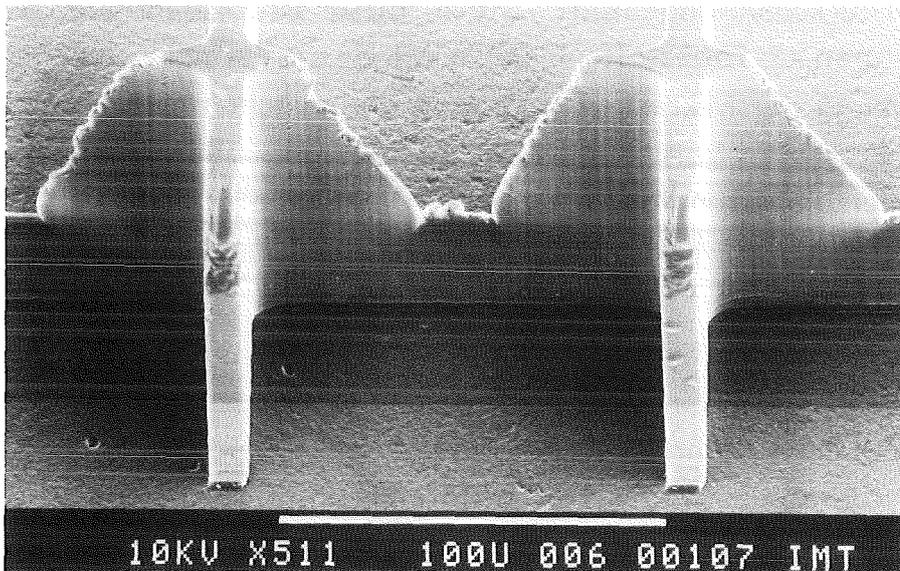


Abb. 4.13: Fließfront der Formmasse (Tab. 3.1, d) bei der Befüllung eines 2 μm breiten Formnests. Der Prägevorgang wurde nach 10 s unterbrochen und die nur zum Teil befüllten Formnester bei 23°C entformt. Prägekraft 30 kN, Prägetemperatur 165°C, Viskosität ca. 20.000 Pa·s.

befüllte 2 μm breite, ca. 100 μm lange und 100 μm hohe Mikrostruktur abgebildet. Diese Mikrostruktur ist an beiden Seiten mit 10 μm breiten Mikrostrukturen verbunden. Die Formnester wurden von der Stirnseite des Formeinsatzes¹⁸⁾ aus befüllt. Es ist deutlich zu erkennen, daß die 10 μm breiten Mikrostrukturen vollständig mit Formstoff ausgefüllt sind. Der Grad der Befüllung der dazwischen liegenden 2 μm breiten Mikrostruktur nimmt zur Mitte hin ab. Dies deutet darauf hin, daß die 2 μm breiten Formnester des Formeinsatzes sowohl von der Stirnseite des Formeinsatzes als auch über die 10 μm breiten Formnester mit Formmasse befüllt wurden. Nach Gleichung 2.11 ist die für die Befüllung der spaltförmigen Formnester notwendige Zeit umgekehrt proportional dem Quadrat der minimalen Spaltbreite, d. h. die 10 μm breiten Formnester werden 25 mal schneller als die 2 μm breiten Formnester mit Formmasse befüllt.

17) Prägekraft: 30 kN, Viskosität der Formmasse bei 165°C: 20.000 Pa·s.

18) Die Stirnseite des Formeinsatzes entspricht dem Strukturgrund der abgeformten Mikrostrukturen (im Bild unten).

Damit entspricht der Verlauf der Fließfront (siehe Abb. 4.13) bei der Befüllung der 2 µm breiten Formnester den makroskopischen Anschauungen des Modells und läßt sich mit den in Kapitel 2.2 vorgestellten Gleichungen beschreiben.

4.3.2 Entformung der Mikrostrukturen

Beim Prägen wird durch die Prägekraft, mit der der Formeinsatz in die Formmasse gedrückt wird, in der Formmasse ein Druck erzeugt, der in den Mikrostrukturen zu einer Druckspannung führt. Durch diese Druckspannung werden die Mikrostrukturen aus Formstoff gegen die Wände des Formeinsatzes gedrückt. Bei der Entformung der Mikrostrukturen muß die zwischen dem Formeinsatz und den Mikrostrukturen vorhandene Haftung/Reibung überwunden werden. Da durch die hierzu notwendige Entformkraft die mikroelektronischen Schaltungen auf dem prozessierten Wafer beschädigt werden können, sollte die Entformkraft möglichst gering sein.

Zur Beschreibung des Einflusses der Abformparameter auf die Entformkraft wurde in dieser Arbeit ein Modell aufgestellt. Um dieses Modell zu überprüfen, das in Kapitel 2.3 ausführlich diskutiert wird, wurden der Einfluß der Prägekraft und der Entformtemperatur auf die Entformkraft untersucht. Hierfür wurden mit dem Wabenprismen-Formeinsatz (Kap. 3.3.2) Mikrostrukturen durch Prägen hergestellt und die zur Entformung der Mikrostrukturen erforderliche Entformkraft mit einer Zugprüfmaschine bestimmt (Kap. 3.3.4).

Durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten von Formeinsatz und Substrat entstehen bei der Abkühlung von der Prägetemperatur auf die Entformtemperatur Schubspannungen zwischen Formeinsatz und Substrat. Dadurch schrumpfen die Mikrostrukturen zum Flächenschwerpunkt des Formeinsatzes auf. Um diesen Einfluß bei der Entformung zunächst zu eliminieren, wurden die Mikrostrukturen auf Stahlsubstraten abgeformt. Der thermische Ausdehnungskoeffizient der Stahlsubstrate beträgt ca. $12 \cdot 10^{-6}/K$ und liegt damit nur unwesentlich unter dem des Formeinsatzes aus Nickel, der ca. $12,8 \cdot 10^{-6}/K$ beträgt [27]. Durch Vermessung der abgeformten Mikrostrukturen und dem Vergleich mit den Abmessungen der Mikrostrukturen des entsprechenden Formeinsatzes konnte gezeigt werden, daß das Aufschrumpfen der Mikrostrukturen aus Formstoff zum Flächenschwerpunkt des Formeinsatzes aufgrund der geringen Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Formeinsatz und den Stahlsubstraten vernachlässigt werden kann.

Bei der Entformung werden die obere und untere Halterung der Laboranlage (vgl. Kap. 3.3.1), in die der Formeinsatz und das Substrat eingebaut sind,

auseinandergezogen. Durch die hierzu notwendige Zugkraft werden die Vorrichtungen gedehnt, so daß zunächst nur die Zugkraft ansteigt, ohne daß die Mikrostrukturen aus dem Formeinsatz herausgezogen werden.

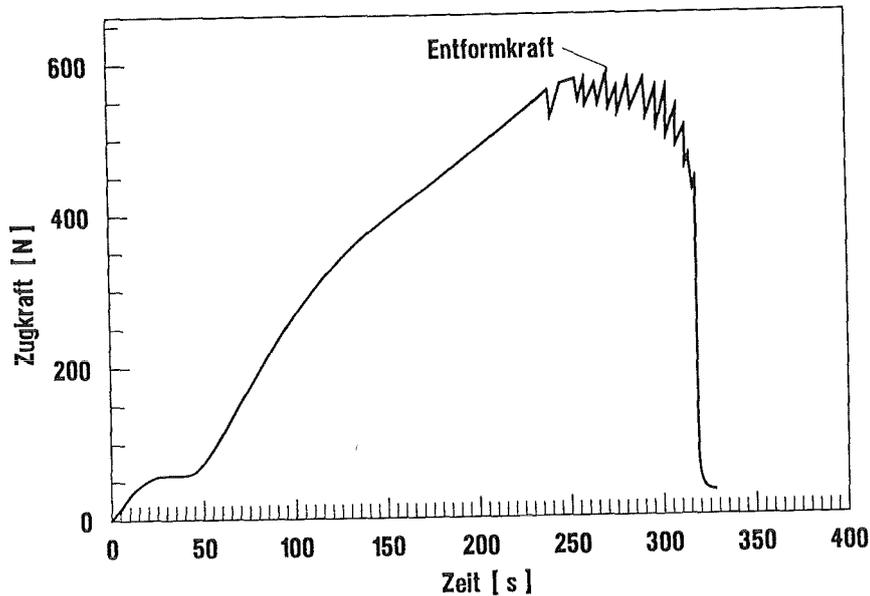


Abb. 4.14: Aufzeichnung der Zugkraft über der Zeit bei der Entformung von Wabenprismen-Mikrostrukturen (Höhe 200 μm). Durch das Auseinanderziehen von Formeinsatz und Substrat steigt die Kraft zunächst an, ohne daß die Mikrostrukturen aus dem Formeinsatz gezogen werden. Bei der Entformkraft (ca. 570 N) wurden die Mikrostrukturen zunächst in mehreren Schritten um jeweils einige μm aus dem Formeinsatz herausgezogen und dann vollständig entformt. Entformgeschwindigkeit 1 $\mu\text{m/s}$, Entformtemperatur 24°C, Formstoff mit 3 Gew. Teilen Trennmittel (Tab.3.1, d).

Die Abbildung 4.14 zeigt die Zugkraft über der Zeit bei der Entformung von Wabenprismen-Mikrostrukturen. Durch das Auseinanderziehen von Formeinsatz und Substrat steigt die auf die Mikrostrukturen wirkende Zugkraft bis zur Überwindung der zwischen dem Formeinsatz und den Mikrostrukturen vorhandenen Haftung/Reibung an. Die Mikrostrukturen werden zunächst nur einige μm aus dem Formeinsatz herausgezogen. Dadurch nimmt die Zugkraft soweit ab, daß die Reibung zwischen dem Formeinsatz und den Mikrostrukturen nicht mehr überwunden werden kann und die Entformung zunächst gestoppt wird. Durch das fortwährende Auseinanderziehen von Formeinsatz und Substrat nimmt die Zugkraft wieder zu, bis die Haftreibung erneut überwunden wird und sich der ganze Vorgang wiederholt. Dieser Effekt, der bei Entformgeschwindigkeiten von 10 $\mu\text{m/s}$ und darunter festgestellt wurde, macht sich durch eine kurzzeitige Verringerung der Zugkraft bemerkbar. Bei höheren Entformgeschwindigkeiten wurden die Mikrostrukturen kontinuierlich entformt.

Bei einer Zugkraft von ca. 570 N wurden die Mikrostrukturen in mehreren Entformzyklen um rund 60 μm entformt. Durch das Herausziehen der Mikro-

strukturen wurde pro Entformzyklus die Zugkraft bis zu 50 N verringert. Da die Entformung weggesteuert durchgeführt wurde, stieg die Kraft zunächst nach jedem Entformzyklus wieder an, bis die Mikrostrukturen erneut um einige μm entformt wurden. Mit zunehmender Entformung nahm die noch zu entformende Mikrostrukturhöhe und damit die im Mittel anliegende Zugkraft ab und die Entformung pro Entformzyklus zu. Nach der Entformung von ca. $60\ \mu\text{m}$ wurden die Mikrostrukturen vollständig entformt.

Das stückweise Herausziehen der Mikrostrukturen aus dem Formeinsatz ist auf die parallelen Wände und die sehr geringe Rauigkeit /7, 8/ der Mikrostrukturwände des Formeinsatzes zurückzuführen. Es deutet außerdem darauf hin, daß die Druckspannung, mit der die Mikrostrukturen aus Formstoff gegen die sie umgebenden Wände des Formeinsatzes gedrückt werden, über der Höhe konstant ist, da die durchschnittliche Zugkraft nach mehreren Entformzyklen nur geringfügig abnahm. Bei der Entformung der ersten Mikrometer werden die waagerechten Wände zwischen Formeinsatz und den Mikrostrukturen aus Formstoff getrennt. Danach steigt die Zugkraft wieder bis auf etwa den selben Wert an, d. h. bei der Entformung der Mikrostrukturen hängt die Entformkraft praktisch nur von der Haftung/Reibung zwischen den senkrechten Wänden des Formeinsatzes und den Mikrostrukturen ab. Die Adhäsionskraft, die an den waagerechten Wänden zwischen Formeinsatz und Mikrostrukturen wirkt, ist sehr gering und kann daher vernachlässigt werden.

In den folgenden Kapiteln werden der Einfluß des Trennmittelgehalts im Formstoff, der Entformgeschwindigkeit, der Prägekraft, der Entformtemperatur und des thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Substrats auf die zur Entformung der Mikrostrukturen notwendigen Entformkraft beschrieben und die optimierten Abformparameter vorgestellt.

Einfluß des Trennmittels im Formstoff auf die Entformkraft

Durch die Zugabe eines internen Trennmittels zum Formstoff kann die Haftung/Reibung zwischen den Mikrostrukturen und dem Formeinsatz vermindert und dadurch die Entformkraft verringert werden. Um beim Prägen den Einfluß des internen Trennmittels im Formstoff auf die Entformkraft zu untersuchen, wurde der Trennmittelgehalt im Formstoff zwischen 0 und 4 Gew. Teilen variiert (Tab. 3.1, a bis e). Die Mikrostrukturen wurden mit dem Wabenprismen-Formeinsatz (Kap. 3.3.2) mit einer Prägekraft von 35 kN auf Stahlsubstraten abgeformt und die Entformkraft bei Raumtemperatur gemessen.

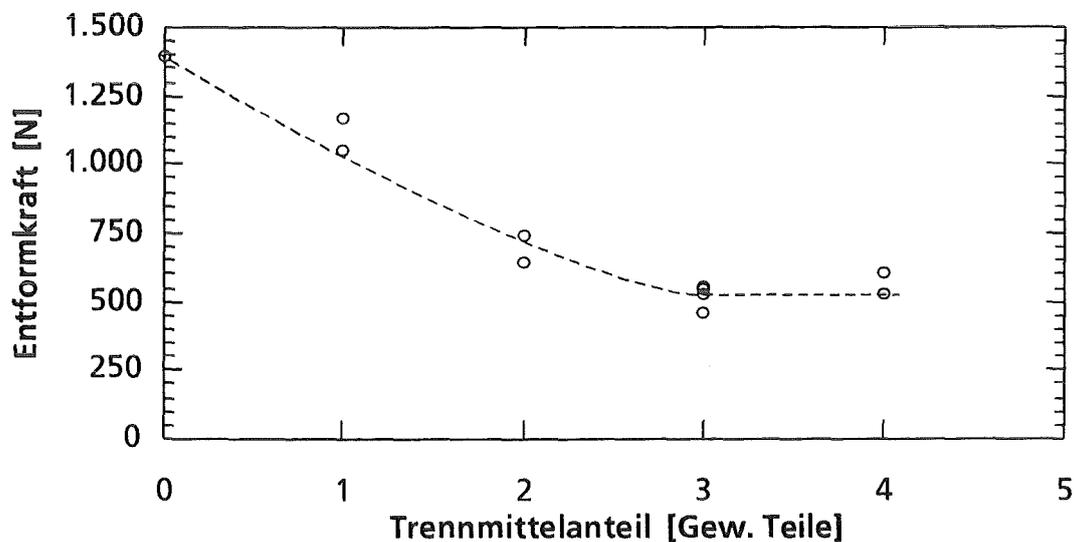


Abb. 4.15: Entformkraft bei Raumtemperatur in Abhängigkeit vom Trennmittelanteil im Formstoff (Tab. 3.1, d); Wabenprismen-Formeinsatz, Prägekraft 35 kN.

In Abbildung 4.15 ist die Entformkraft über dem Trennmittelanteil des Formstoffes aufgetragen. Beim Formstoff ohne Trennmittel beträgt die Entformkraft rund 1.400 N und nimmt mit zunehmendem Trennmittelanteil auf durchschnittlich 521 N ab (3 Gew. Teile Trennmittel). Beim Formstoff mit 4 Teilen Trennmittel ergaben sich mit 530 N und 600 N vergleichbare Entformkräfte. Bei einem Formstoff mit mehr als 4 Gew. Teilen Trennmittel traten in den abgeformten Mikrostrukturen Poren auf /17/.

Sowohl beim Prägen als auch bei der Abformung mit Reaktionsgießharz (vgl. /17/ und Abb. 2.2) wird durch die Zugabe eines internen Trennmittels die Entformkraft stark herabgesetzt. In beiden Fällen nimmt die Entformkraft bis zu einem Trennmittelanteil von 3 Teilen ab und kann durch eine weitere Erhöhung des Trennmittelanteils nicht weiter bzw. nur noch unwesentlich verringert werden. Aus diesem Grund wurden alle nachfolgend beschriebenen Untersuchungen mit einem Formstoff mit 3 Gew. Teilen Trennmittel durchgeführt.

Einfluß der Entformgeschwindigkeit auf die Entformkraft

Um den Einfluß der Entformgeschwindigkeit auf die Entformkraft zu untersuchen, wurden auf Stahlsubstraten Mikrostrukturen mit dem Wabenprismen-Formeinsatz (Kap. 3.3.2) mit einer Prägekraft von 35 kN abgeformt (vgl. Kap. 3.3.3). Die Mikrostrukturen wurden bei Raumtemperatur mit einer Geschwindigkeit zwischen $0,1 \mu\text{m/s}$ und $5.000 \mu\text{m/s}$ mit der Zugprüfmaschine entformt und die hierzu notwendige Entformkraft bestimmt.

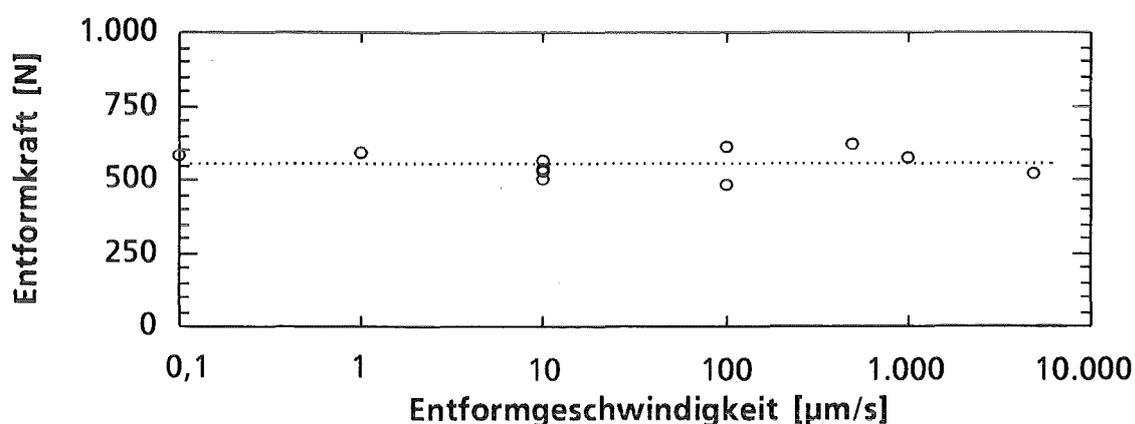


Abb. 4.16: Abhängigkeit der Entformkraft von der Entformgeschwindigkeit. Wabenprismen-Formeinsatz (Formnesttiefe $200 \mu\text{m}$), Prägekraft 35kN, Entformtemperatur 23°C , Formstoff mit 3 Gew. Teilen Trennmittel (Tab. 3.1, d).

In Abbildung 4.16 ist die Entformkraft über der Entformgeschwindigkeit dargestellt. Über den gesamten Geschwindigkeitsbereich bleibt die Entformkraft praktisch konstant, d.h. die Entformkraft ist im untersuchten Geschwindigkeitsbereich unabhängig von der Entformgeschwindigkeit.

Einfluß der Prägekraft auf die Entformkraft

Um den Einfluß der Prägekraft auf die Entformkraft zu untersuchen, wurde die Formmasse mit dem Wabenprismen-Formeinsatz (Kap. 3.3.2) bei unterschiedlichen Prägekräften strukturiert. Die Mikrostrukturen wurden bei 23°C mit einer Geschwindigkeit von $10 \mu\text{m/s}$ entformt und die hierzu notwendige Entformkraft bestimmt.

In Abbildung 4.17 ist die Entformkraft über der Prägekraft aufgetragen. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß durch eine hohe Prägekraft eine hohe Entformkraft verursacht wird. Bei einer Prägekraft von 50,5 kN war zur Entformung der Mikrostrukturen eine Entformkraft von über 1.600 N notwendig. Durch die Verringerung der Prägekraft nahm die Entformkraft deutlich ab. Bei einer

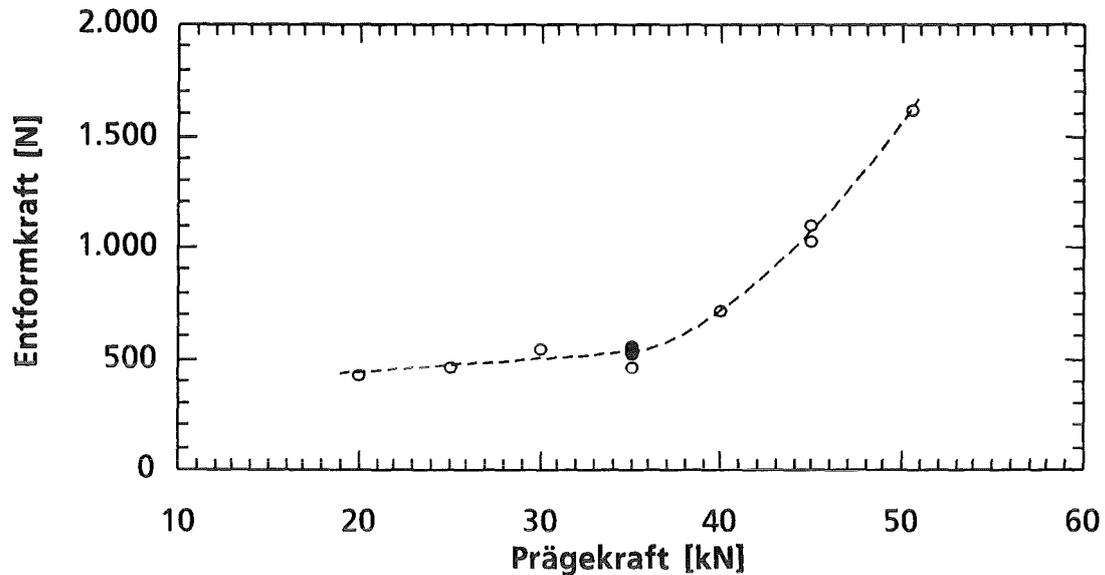


Abb. 4.17: Abhängigkeit der Entformkraft von der Prägekraft. Die Entformkraft nimmt bei Verringerung der Prägekraft bis auf ca. 500 N ab. Wabenprismen-Formeinsatz (Formnesttiefe 200 μm), Entformtemperatur 23°C, Entformgeschwindigkeit 10 $\mu\text{m/s}$, Formstoff mit 3 Gew. Teilen Trennmittel (Tab. 3.1, d).

Prägekraft von 35 kN lag die durchschnittliche Entformkraft bei 521 N¹⁹⁾. Eine weitere Verringerung der Prägekraft führte nur noch zu einer geringfügigen Abnahme der Entformkraft.

Dieses Ergebnis bestätigt die Vorstellung aus dem Modell (Kap. 2.3), wonach durch eine hohe Prägekraft in den Mikrostrukturen aus Formstoff eine hohe Druckspannung erzeugt wird. Die Druckspannung wird durch die unterschiedliche thermische Ausdehnung von Formeinsatz und Formstoff bei der Abkühlung auf die Entformtemperatur nur teilweise abgebaut. Bei der Entformung führt eine erhöhte Druckspannung in den Mikrostrukturen aus Formstoff zu einer erhöhten Haftung/Reibung zwischen Formeinsatz und Mikrostrukturen und damit zu einer erhöhten Entformkraft. Unterhalb einer Prägekraft von 35 kN kann die Druckspannung in den Mikrostrukturen nahezu vollständig abgebaut werden, so daß sich eine minimale Entformkraft ergibt.

19) Mittelwert aus 7 Versuchen, Standardabweichung: ± 14 N.

Einfluß der Entformtemperatur auf die Entformkraft

Um den Einfluß der Entformtemperatur auf die Entformkraft zu untersuchen, wurden mit dem Wabenprismen-Formeinsatz (Kap. 3.3.2) Mikrostrukturen mit einer Prägekraft von 35 kN erzeugt. Die Mikrostrukturen wurden zwischen 23 °C und 55 °C entformt.

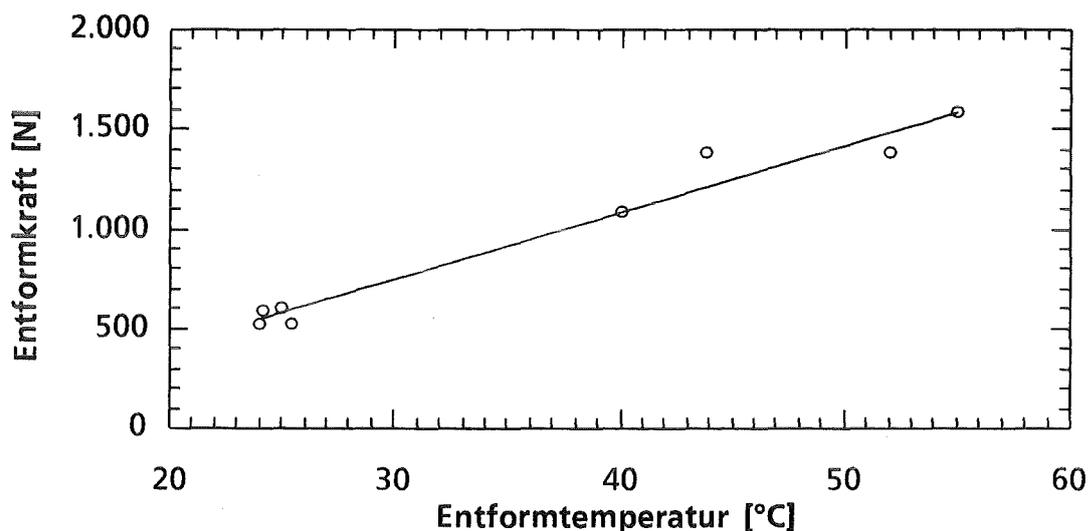


Abb. 4.18: Einfluß der Entformtemperatur auf die zur Entformung von 80 µm-Wabenprismen (Höhe 200 µm) notwendige Entformkraft. Die Entformkraft nimmt mit abnehmender Entformtemperatur ab. Prägekraft 35kN, Entformgeschwindigkeit 10 µm/s, Formstoff mit 3 Gew. Teilen Trennmittel (Tab. 3.1, d).

In Abbildung 4.18 ist die Entformkraft über der Entformtemperatur aufgetragen. Die Entformkraft nimmt mit abnehmender Entformtemperatur von 1.590 N bei 55 °C auf 521 N bei 23 °C ab. Bezogen auf die Stirnfläche der abgeformten Mikrostrukturen ergibt sich daraus eine Zugspannung von 4,0 MPa (55 °C) bzw. 1,3 MPa (23 °C).

Dieses Ergebnis bestätigt das Modell (Kap. 2.3). Durch die Abkühlung von der Prägetemperatur auf die Entformtemperatur ziehen sich säulenförmige Mikrostrukturen stärker zusammen als der sie umgebende Formeinsatz. Dadurch wird die Druckspannung in den Mikrostrukturen aus Formstoff verringert, die beim Prägen durch die Prägekraft in den Mikrostrukturen erzeugt wurde. Mit abnehmender Temperatur nimmt die Flächenpressung der Mikrostrukturen auf die Wände des Formeinsatzes ab, so daß eine geringere Entformkraft zur Überwindung der Haftung/Reibung zwischen den Mikrostrukturen und dem Formeinsatz erforderlich ist.

Bei dem Modell wurde der gleiche thermische Ausdehnungskoeffizient von Formeinsatz und Substrat vorausgesetzt. Aus diesem Grund wurden zur Überprüfung des Modells die Mikrostrukturen auf Stahlsubstraten abgeformt, die

annähernd den gleichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten wie der Formeinsatz aus Nickel besitzen.

Einfluß des thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Substrats auf die Entformkraft

Um den Einfluß des thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Substrats auf die Entformkraft zu untersuchen, wurden Mikrostrukturen (80 µm-Wabenprismen, Höhe 200 µm) auf Invar- und Stahlsubstraten abgeformt. Die Formmasse wurde mit einer Prägekraft von 35 kN strukturiert und die Mikrostrukturen bei 23 °C mit einer Entformgeschwindigkeit von 10 µm/s entformt.

Der thermische Ausdehnungskoeffizient der Invarsubstrate beträgt ca. $1,8 \cdot 10^{-6}/K$ und der der Stahlsubstrate ca. $12 \cdot 10^{-6}/K$. Die Mikrostrukturen wurden bei 23 °C mit einer Geschwindigkeit von 10 µm/s entformt. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die zur Entformung der Mikrostrukturen auf Invarsubstraten notwendige Entformkraft mit durchschnittlich 820 N²⁰⁾ deutlich über dem Vergleichswert auf Stahlsubstraten (521 N²¹⁾) liegt.

Der thermische Ausdehnungskoeffizient von Silizium beträgt ca. $2,3 \cdot 10^{-6}/K$ und liegt damit nur geringfügig über dem Ausdehnungskoeffizient von Invar. Bei der Abformung auf Si-Wafern war mit rund 800 N annähernd die gleiche Entformkraft notwendig.

Die erhöhte Entformkraft bei der Abformung von Mikrostrukturen auf Si-Wafern und Invarsubstraten wird nach den oben geschilderten Versuchsergebnissen auf die Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten zum Formeinsatz zurückgeführt. Durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Formeinsatz und Substrat schrumpfen die Mikrostrukturen bei der Abkühlung in Richtung des Flächenschwerpunktes des Formeinsatzes auf. Hierdurch ergibt sich eine erhöhte Entformkraft.

20) Mittelwert aus 5 Versuchen, Standardabweichung: ± 63 N

21) Mittelwert aus 7 Versuchen, Standardabweichung: ± 14 N

4.3.3 Optimierte Abformparameter

Durch das Trennmittel im Formstoff verringert sich die für die Entformung der Mikrostrukturen notwendige Entformkraft. Wie die hierzu durchgeführten Untersuchungen gezeigt haben, wird bei einem Trennmittelgehalt von 3 Gew. Teilen die minimale Entformkraft erreicht (vgl. Abb. 4.15). Durch das Trennmittel verändern sich auch die Werkstoffeigenschaften des Formstoffes. Der thermische Ausdehnungskoeffizient des Formstoffes nimmt mit zunehmendem Trennmittelanteil zu. Ein hoher thermischer Ausdehnungskoeffizient des Formstoffes ist vorteilhaft, da sich hierdurch die Druckspannung in den Mikrostrukturen bei der Abkühlung verringert und deshalb die Entformkraft abnimmt (vgl. Kap. 2.3). Da mit zunehmendem Trennmittelanteil die Zugfestigkeit und die 0,2 %-Dehnspannung des Formstoffes abnehmen (vgl. Kap. 4.2.4) und bei über 4 Gew. Teilen Trennmittel Poren in den Mikrostrukturen auftreten [17], liegt der optimale Trennmittelanteil im Formstoff bei 3 Gew. Teilen (Tab. 3.1, d).

Um beim Prägen die Belastung des prozessierten Wafers gering zu halten und trotzdem den Formeinsatz vollständig mit Formmasse zu befüllen, wurde der Formstoff bei einer Temperatur von 165 °C mit einer Prägekraft von 20 kN strukturiert.

Durch eine hohe Prägekraft wird in den Mikrostrukturen eine Druckspannung erzeugt, die bei der Entformung der Mikrostrukturen zu einer erhöhten Entformkraft führt (vgl. Kap. 2.3 und Abb. 4.17). Um die Entformkraft und damit die Belastung des prozessierten Wafers möglichst gering zu halten, wurde die Prägekraft vor der Abkühlung auf wenige 100 N herabgesetzt. Dadurch kann die Druckspannung abgebaut werden, die durch die Prägekraft in den Mikrostrukturen erzeugt wurde.

Mit abnehmender Temperatur nehmen Zugfestigkeit, 0,2 %-Dehnspannung und Elastizitätsmodul des Formstoffes zu (Abb. 4.8) und die zur Entformung der Mikrostrukturen notwendige Entformkraft (Abb. 4.18) ab. Aus diesem Grund werden die Mikrostrukturen bei Raumtemperatur entformt.

Unter diesen optimierten Abformbedingungen liegt die Entformkraft bei der Abformung von Wabenprismen-Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern trotz der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Silizium und Formeinsatz bei rund 500 N.

Mit dem Beschleunigungssensor-Formeinsatz (Kap. 3.3.2) konnte gezeigt werden, daß unter optimierten Abformbedingungen sogar 2 µm breite Mikrostrukturen mit einer Höhe von 100 µm praktisch ohne plastische Verformung abgeformt werden können. Dies ist deshalb bemerkenswert, weil bei diesen Mikrostruk-

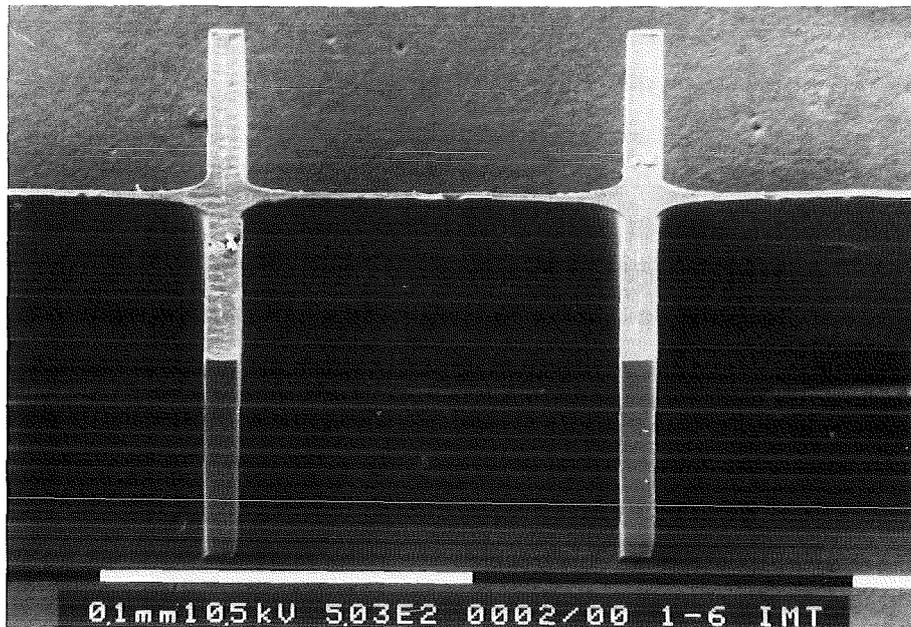


Abb. 4.19: Aufnahme (REM, 500fache Vergrößerung) einer abgeformten Mikrostruktur aus Formstoff. Trotz der geringen Mikrostrukturbreite von nur $2\ \mu\text{m}$ und einer Höhe von $100\ \mu\text{m}$ weist die abgeformte Mikrostruktur keine plastische Verformung auf. Die $2\ \mu\text{m}$ breite Mikrostruktur ist ca. $100\ \mu\text{m}$ lang und an beiden Seiten mit $10\ \mu\text{m}$ breiten Mikrostrukturen verbunden. Beschleunigungssensor-Formeinsatz, Prägekräft $20\ \text{kN}$, Entformtemperatur 23°C , Entformgeschwindigkeit $10\ \mu\text{m/s}$. Formstoff mit 3 Gew. Teilen Trennmittel (Tab. 3.1, d).

turen die Fläche der senkrechten Mikrostrukturwände, an denen bei der Entformung die Reibkräfte angreifen, 100mal größer als die Grundfläche der Mikrostrukturen ist. Dadurch ergibt sich bei der Entformung in den Mikrostrukturen eine extrem hohe Zugspannung, durch die die Mikrostrukturen reißen oder plastisch verformt werden können.

Abbildung 4.19 zeigt eine auf einem Stahlsubstrat abgeformte $2\ \mu\text{m}$ breite, $100\ \mu\text{m}$ hohe und ca. $100\ \mu\text{m}$ lange Mikrostruktur aus Formstoff. Die Mikrostruktur ist an beiden Seiten mit $10\ \mu\text{m}$ breiten Mikrostrukturen verbunden. Allerdings konnte nur ein Teil der $2\ \mu\text{m}$ breiten Mikrostrukturen fehlerfrei entformt werden. Die übrigen Mikrostrukturen wurden im Strukturgrund abgerissen. Die Ursache hierfür liegt in der geringen Mikrostrukturbreite von $2\ \mu\text{m}$. Die Abformung von $2\ \mu\text{m}$ breiten Mikrostrukturen aus PMMA dürfte die momentane Grenze für die Entformbarkeit von Mikrostrukturen darstellen.

4.4 Herstellung metallischer Mikrostrukturen

Für die Herstellung metallischer Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern wurden auf die zuvor mit einer Galvanikstartschicht (TiO_x) versehenen Waferoberfläche Mikrostrukturen aus Formstoff abgeformt. Beim Prägen wurde der Formstoff zwischen Formeinsatz und prozessiertem Wafer nicht vollständig verdrängt, um den prozessierten Wafer nicht durch den Formeinsatz mechanisch zu beschädigen. Deshalb verbleibt zwischen den Mikrostrukturen aus Formstoff eine dünne, elektrisch isolierende Restschicht (vgl. Kap. 2.4).

Die über der Galvanikstartschicht (TiO_x) verbleibende Restschicht aus Formstoff wurde durch reaktives Ionenätzen (RIE) im Sauerstoffplasma entfernt.

Die im folgenden dargestellten Versuchsergebnisse wurden an abgeformten Wabenprismen-Mikrostrukturen bei konstanten Ätzparametern (Leistung 60W, Sauerstoffplasma, O_2 -Druck 1Pa, Biasspannung ca. -420V, Al-Elektrode) ermittelt. Die Ätzzeit wurde zwischen 20 Minuten und 5 Stunden variiert.

Der vertikale Ätzabtrag wurde an der Stirnseite und im Strukturgrund der Mikrostrukturen mit einem Tastschnittgerät und an Schliften bestimmt, die senkrecht zur Substratoberfläche angefertigt wurden. Mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) wurden Stirnseite und Seitenwände der Mikrostrukturen vor und nach dem Ätzen vermessen und daraus der laterale Ätzabtrag ermittelt.

4.4.1 Vertikaler Ätzabtrag an Mikrostrukturen

Der vertikale Abtrag wurde an der Mikrostruktur-Stirnseite und zwischen den Mikrostrukturen im Strukturgrund untersucht. Es konnte experimentell gezeigt werden, daß sich die Restschicht zwischen den Mikrostrukturen aus Formstoff durch reaktives Ionenätzen beseitigen läßt, ohne dabei die Mikrostrukturen zu beschädigen. In Abbildung 4.20 ist der Abtrag bei konstanten Ätzbedingungen über der Ätzzeit aufgetragen.

Nach einer Ätzzeit von insgesamt 5 mal 1 Stunde wurde an der Mikrostruktur-Stirnseite ein durchschnittlicher Abtrag von $38,7 \mu\text{m}$ gemessen. Der Abtrag im Strukturgrund beträgt ca. $37,5 \mu\text{m}$. Daraus ergibt sich für die Mikrostruktur-Stirnseite eine Abtragsrate von $7,7 \mu\text{m/h}$ und für den Strukturgrund von $7,5 \mu\text{m/h}$. Da die Abtragsraten an der Mikrostruktur-Stirnseite und im Strukturgrund fast gleich groß sind, verringert sich die Gesamthöhe der Mikrostrukturen beim Freiätzen der Galvanikstartschicht nur unwesentlich. Bei zunehmender Ätzzeit ergab sich keine Zunahme der Abtragsrate. Die bei verschiedenen Versuchen gemessene mittlere Abtragsrate der Mikrostruktur-Stirnseite lag zwischen $6,5 \mu\text{m/h}$ und $8,7 \mu\text{m/h}$. Als Ursache für die Schwankungen kommen sowohl

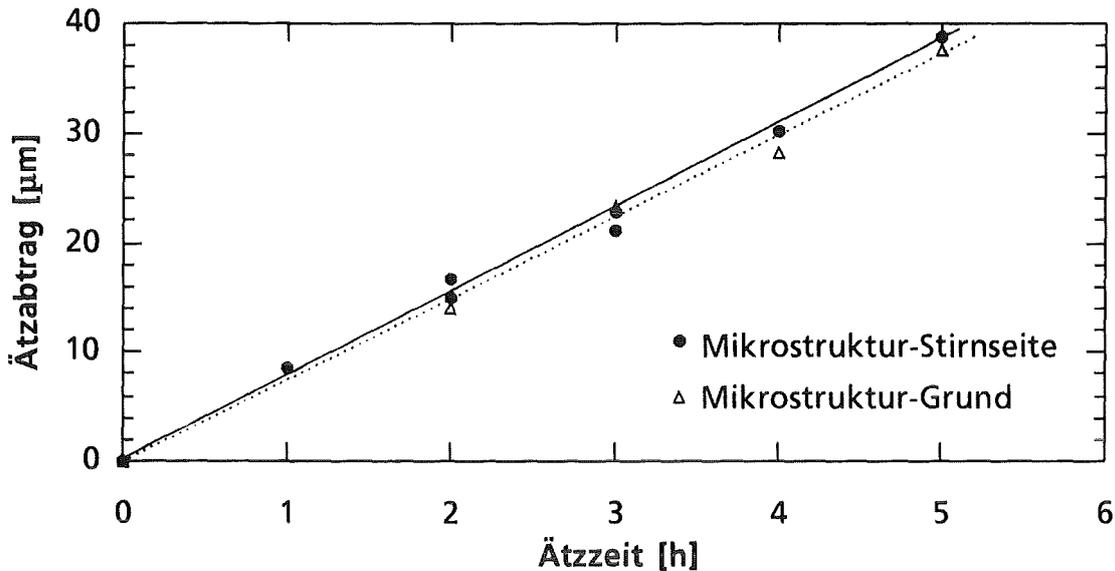


Abb. 4.20: PMMA-Abtrag an Mikrostrukturen durch Ätzen mit reaktiven Ionen; RIE:
Leistung 60 W, Sauerstoffplasma, $p_{O_2} = 1$ Pa, Biasspannung ca. -420 V, Al-Elektrode.

Spurenanteile anderer Ätzmedien aus vorangegangenen Versuchen als auch eine Änderung der Biasspannung (-405 V bis -430 V) in Betracht.

4.4.2 Lateraler Ätzabtrag an Mikrostrukturen

Neben dem Abtrag im Strukturgrund und an der Stirnseite der Mikrostrukturen werden beim Ätzen auch die senkrechten Mikrostrukturwände angegriffen und dadurch die Breite der abgeformten Mikrostrukturen verringert. Dieser senkrecht zur Waferoberfläche stattfindende Ätzabtrag wurde über die Verringerung der Mikrostrukturbreite bestimmt. Der an der Stirnseite der Mikrostrukturen gemessene laterale Abtrag lag nach einer Ätzzeit von 2 Stunden bei $0,36 \mu\text{m}$ und nach 3 Stunden bei $0,49 \mu\text{m}$. Das entspricht einer Abtragsrate von $0,18 \mu\text{m/h}$ (2h) bzw. $0,16 \mu\text{m/h}$ (3h). Im selben Versuch wurden in Ätzrichtung $8,7 \mu\text{m/h}$ (2h) bzw. $8,1 \mu\text{m/h}$ (3h) gemessen. Damit ergibt sich ein Verhältnis des vertikalen zum lateralen Abtrag von 50.

Durch das Aufgalvanisieren von Mikrostrukturen aus Nickel bzw. Kupfer²²⁾ wurde der Nachweis der Galvanisierbarkeit der freigelegten TiO_x -Schicht erbracht. Hierbei wurden an verschiedenen Proben Restschichtdicken zwischen $6 \mu\text{m}$ und $35 \mu\text{m}$ durch reaktives Ionenätzen im Sauerstoffplasma abgetragen und anschließend Mikrostrukturen aus Kupfer oder Nickel aufgalvanisiert. Die Abbildung 4.21 zeigt einen Silizium-Wafer mit einer ca. $2 \mu\text{m}$ dicken TiO_x -Schicht, auf den nach dem Freilegen der TiO_x -Schicht Mikrostrukturen aus Nickel aufgalvanisiert wurden.

22) Die Mikrostrukturen wurden in Nickelsulfamat- bzw. schwefelsaurem Kupfer-Elektrolyten /36, 37/ aufgalvanisiert. Die Stromdichte lag im Nickelelektrolyten bei $1,8 \text{ A/dm}^2$ und im Kupferelektrolyten bei 4 A/dm^2 .

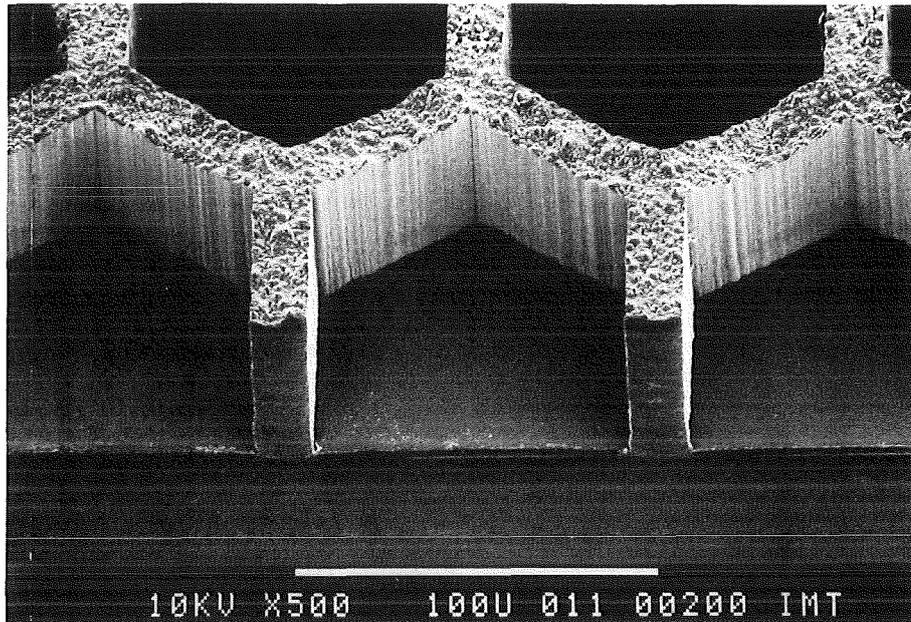


Abb. 4.21: Mikrostrukturen aus Nickel, die nach Abformung (PMMA) und Freilätzen mit RIE auf einem mit TiO_x beschichteten Silizium-Wafer aufgalvanisiert wurden. Die Strukturhöhe der Mikrostrukturen aus Nickel beträgt ca. $45 \mu\text{m}$. Beim Polieren der Schnittkante hat sich teilweise die TiO_x -Schicht zwischen den Mikrostrukturen aus Nickel vom Silizium-Wafer gelöst.

4.5 Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern

Auf der Grundlage der bisher vorgestellten Abformergebnisse auf verschiedenen Substraten wurden Mikrostrukturen auf Si-Wafern mit mikroelektronischen Schaltungen (prozessierte Wafer) abgeformt. Um Mikrostrukturen aus Metall direkt auf den mikroelektronischen Schaltkreisen aufzug galvanisieren, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Abformverfahren entwickelt. Bei diesem Verfahren, das in Kap. 2.4 beschrieben ist, werden zunächst Mikrostrukturen aus Formstoff auf dem prozessierten Wafer abgeformt. Zwischen diese Strukturen werden anschließend Mikrostrukturen aus Metall aufgalvanisiert.

Mit diesem Abformverfahren wurden erstmals Mikrostrukturen aus Nickel auf einem prozessierten Wafer abgeformt (Abbildungen 4.21 und 4.22).

Um festzustellen, ob die Funktion der mikroelektronischen Schaltungen durch das Prägen beeinträchtigt wird, wurden Mikrostrukturen aus Formstoff (PMMA) auf zuvor geprüften Testschaltungen (C-MOS) abgeformt. Hierbei wurden die mikroelektronischen Schaltungen bei einer Temperatur von 165°C mit einer Prägekraft von 20 kN belastet, das entspricht einer Druckspannung von 12 MPa. Die Mikrostrukturen wurden bei Raumtemperatur entformt. Die Entformkraft lag bei rund 500 N, das entspricht einer Zugspannung von 0,35 MPa. Nach der Entformung wurden die Mikrostrukturen in Ethylacetat (23°C) vollständig

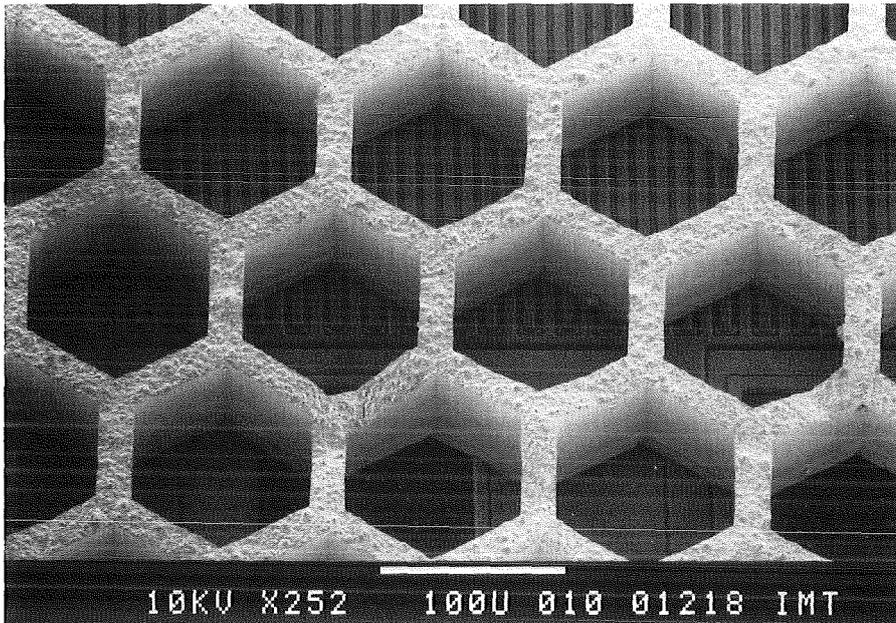


Abb. 4.21: Aufnahme (REM, 250fache Vergrößerung) von mikroelektronischen Schaltungen eines prozessierten Wafers, auf den Mikrostrukturen aus Nickel abgeformt wurden. Die Mikrostrukturen sind ca. 50 μm hoch, die Stegbreite beträgt rund 8 μm . Nach dem Aufgalvanisieren der Mikrostrukturen aus Nickel wurden die Mikrostrukturen aus Formstoff (PMMA) in Ethylacetat aufgelöst, so daß im Strukturgrund zwischen den Mikrostrukturen aus Nickel die mikroelektronischen Schaltungen zu sehen sind.

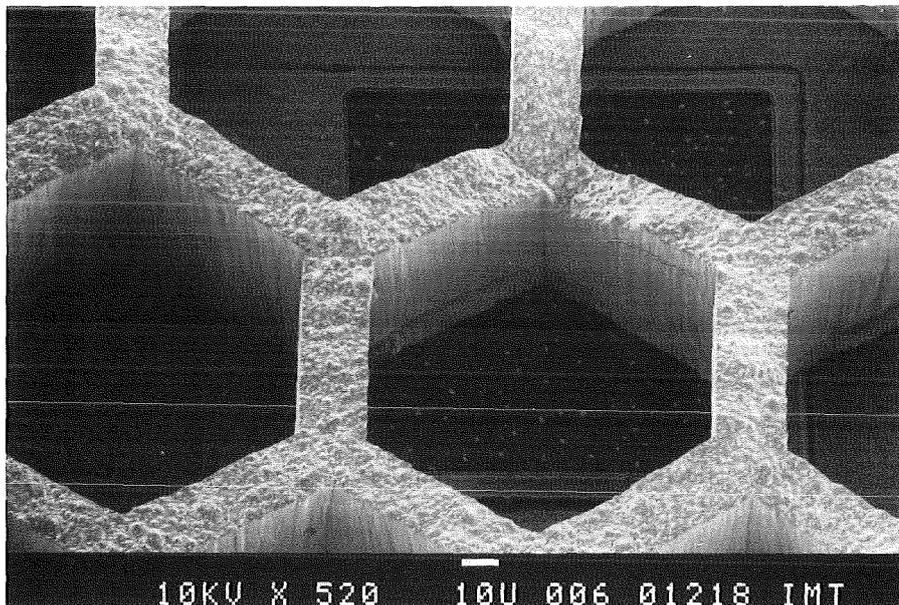


Abb. 4.22: Ausschnitt aus Abb. 4.21 bei 520facher Vergrößerung.

aufgelöst und die mikroelektronischen Testschaltungen erneut geprüft. Hierbei wurden gegenüber dem ursprünglichen Zustand keine Veränderungen der elektrischen Eigenschaften festgestellt, d. h. die mikroelektronischen Testschaltungen haben die Abformung von Mikrostrukturen aus Formstoff unbeschadet überstanden.

5. Ausblick

Zur Herstellung von Mikrosystemen wird der vertikale Aufbau von mikromechanischen Bauelementen, die nach dem LIGA-Verfahren hergestellt werden, direkt auf mikroelektronischen Schaltungen angestrebt. Durch die Kombination unterschiedlicher Technologien - LIGA- und Silizium-Technik - können bei der Herstellung von Mikrosystemen die Vorteile beider Technologien genutzt werden:

Mit der LIGA-Technik können mikromechanische Sensoren und Aktoren mit beliebiger lateraler Geometrie und einer Strukturhöhe von mehreren 100 µm aus Metall oder Kunststoff erzeugt werden. Die zur Auswertung der Sensorsignale und Ansteuerung der Aktoren notwendigen mikroelektronischen Schaltungen können mit bewährten Verfahren der Silizium-Technik hergestellt werden. Diese ermöglichen eine hohe Integrationsdichte der mikroelektronischen Bauelemente und eine hohe Ausbeute.

Durch getrennte Herstellung von Prototypen können die Einzelkomponenten beider Technologien unabhängig voneinander geprüft werden. Zum Aufbau von Mikrosystemen mit hoher Funktionsdichte werden die mikromechanischen Sensoren und Aktoren direkt auf den mikroelektronischen Schaltungen erzeugt.

In der vorliegenden Arbeit wurde durch theoretische Überlegungen und experimentelle Ergebnisse gezeigt, daß durch Prägen Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern, und damit auf mikroelektronischen Schaltungen, abgeformt werden können.

Beim LIGA-Verfahren wird durch die Abformung von Mikrostrukturen der Einsatz von harter Synchrotronstrahlung vermieden, durch die die mikroelektronischen Schaltungen geschädigt werden. Als Voraussetzung für die Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern muß eine geringe Entformkraft erreicht werden. Der Einfluß des Abformprozesses auf die zur Entformung der Mikrostrukturen notwendige Entformkraft wurde in einem Modell beschrieben und durch experimentelle Untersuchungen bestätigt. Durch die Minimierung der Entformkraft konnten Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern abgeformt werden, ohne dadurch die Funktion der mikroelektronischen Schaltungen zu beeinträchtigen. Damit ist es möglich, einfache Mikrosysteme aus mikromechanischen und mikroelektronische Bauelementen herzustellen.

Durch die Abformung von Mikrostrukturen direkt auf den mikroelektronischen Schaltungen können Mikrostrukturen aus Kunststoff oder galvanisch abgeschiedenem Metall vertikal integriert und damit ohne Draht- oder andere Bondverfahren mit den mikroelektronischen Schaltungen verbunden werden /16/.

Als Voraussetzung hierfür müssen allerdings bestimmte Bereiche der mikroelektronischen Schaltungen, die mit einer Isolationsschicht geschützt sind, mit einer Metallisierungsschicht versehen werden. Da bei der vertikalen Integration verschiedene Bereiche der metallischen Mikrostrukturen mit den mikroelektronischen Schaltungen verbunden werden, müssen Metallisierungs- und Isolationsschicht entsprechend strukturiert werden. Über Pads, Leiterbahnen und die strukturierte Metallisierungsschicht können die mikroelektronischen Schaltungen mit verschiedenen Bereichen der Mikrostrukturen verbunden werden.

Weil die Mikrostrukturen nur auf der Metallisierungsschicht aufgalvanisiert werden dürfen, muß die Abformung der Kunststoffstrukturen positioniert erfolgen. Mit der positionierten Abformung von Mikrostrukturen befaßt sich eine wissenschaftliche Arbeit, die im IMT begonnen wurde.

Durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Mikrostrukturen und des prozessierten Wafers können im Wafer mechanische Spannungen entstehen. Diese Spannungen dürfen jedoch nicht zu einer Verstimmung der mikroelektronischen Schaltungen führen. Deshalb ist ein räumlicher Mindestabstand der Mikrostrukturen zu spannungsempfindlichen Bauteilen der Mikroelektronik notwendig. Auch aus diesem Grund muß die Abformung der Mikrostrukturen auf den mikroelektronischen Schaltungen positioniert erfolgen.

Im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Abformung von LIGA-Mikrostrukturen auf mikroelektronischen Schaltungen ergeben sich vor allem zwei weitere Themenschwerpunkte. Durch die Abformung von Mikrostrukturen aus Formstoff mit großem Aspektverhältnis bzw. großem Flächenverhältnis (vgl. Kap. 3.3.2) können Aussagen über die Entformbarkeit der Mikrostrukturen in Abhängigkeit von der Strukturhöhe, den minimalen lateralen Abmessungen und der Mikrostrukturgeometrie gewonnen werden. Hieraus lassen sich dann Designregeln für die Abformung von Mikrostrukturen ableiten. Dabei hängt die Entformbarkeit der Mikrostrukturen ganz erheblich von der Festigkeit, dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten und dem Deformationsverhalten des Formstoffes sowie dem Reibungskoeffizienten zwischen den Mikrostrukturen aus Formstoff und dem Formeinsatz ab.

Der zweite Schwerpunkt liegt in der Herstellung beweglicher Mikrostrukturen. Hier bietet sich z.B. die Übertragung des aus der Röntgentiefenlithographie bekannten "Opferschichtverfahrens" zur Herstellung von Beschleunigungssensoren an /6, 10, 13/. Hierbei werden zunächst eine Galvanikstartschicht und eine Opferschicht auf ein elektrisch isolierendes Substrat aufgebracht und durch Photolithographie und Ätzung unterschiedlich strukturiert. Durch justierte Ab-

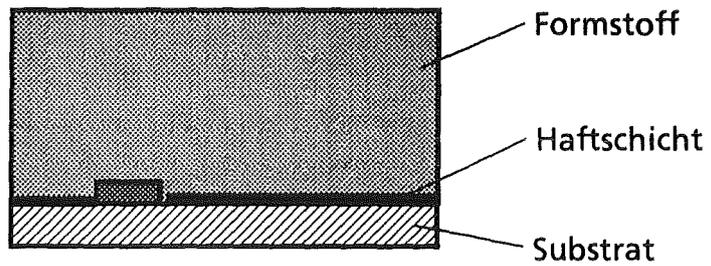
formung sollen die Mikrostrukturen aus Formstoff so auf dem Substrat abgeformt werden, daß bei der anschließenden Galvanoformung der Teil, der fest auf dem Substrat stehen soll, auf der Galvanikstartschicht und der bewegliche Teil der Mikrostruktur über der Opferschicht aufgalvanisiert wird. Zuvor wird analog zu dem in dieser Arbeit beschriebenen Abformverfahren die Restschicht aus Formstoff über dem Substrat entfernt. Nach dem Auflösen des Formstoffes und dem Ätzen der Opferschicht ist ein Teil der metallischen Mikrostrukturen frei beweglich. Beim Beschleunigungssensor ist die bewegliche seismische Masse über einen schmalen Metallsteg mit dem auf dem Substrat stehenden Teil der Mikrostruktur verbunden.

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen besteht in der Abformung mit einem gestuften Formeinsatz /9/. Hiermit befaßt sich eine weitere wissenschaftliche Arbeit, die zur Zeit am IMT durchgeführt wird. In Abbildung 5.1 ist ein Konzept zur Herstellung von Beschleunigungssensoren durch Abformung dargestellt. Zunächst wird auf einem elektrisch isolierenden Substrat eine Galvanikstartschicht aufgebracht und strukturiert. Bei der justierten Abformung muß der Teil der Mikrostrukturen, der später fest auf dem Substrat stehen soll, über der Galvanikstartschicht abgeformt werden. Nach der Entfernung der Restschicht über der Galvanikstartschicht (vgl. Kap. 4.5) können die Mikrostrukturen aufgalvanisiert werden. Da im Gegensatz zum Opferschichtverfahren die Mikrostrukturen zunächst nur an der mit dem Substrat verbundenen Stelle aufgalvanisiert werden, müssen die später beweglichen Teile durch „galvanisches Überwachsen“ des Formstoffes gefüllt werden. Durch die Galvanoformung von gestuften Mikrostrukturen entstehen Bereiche, die nach dem Auflösen des Formstoffes frei beweglich sind. Beim Beschleunigungssensor ist die bewegliche seismische Masse über einen schmalen Steg mit einer auf dem Substrat stehenden Struktur verbunden.

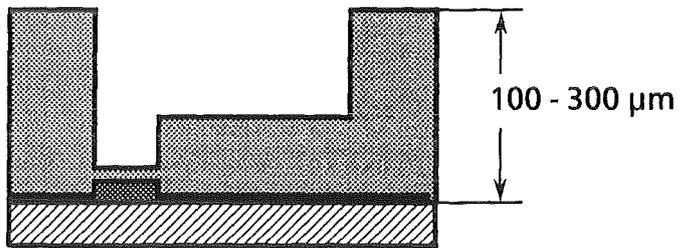
Im Gegensatz zum Opferschichtverfahren, bei dem die Opferschicht aus prozeßtechnischen Gründen nur wenige Mikrometer dick ist /13/, ermöglicht die Abformung von gestuften Mikrostrukturen einen sehr viel größeren Abstand²³⁾ der beweglichen Mikrostrukturen zum Substrat. Außerdem entfällt das Freiätzen der beweglichen Mikrostrukturen, das bei der Abformung auf prozessierten Wafern aufgrund der Ätzzeiten von mehreren Stunden zur Zerstörung der mikroelektronischen Schaltungen führen kann. Allerdings ist die Herstellung eines gestuften Formeinsatzes deutlich aufwendiger als bei einem ungestuften Formeinsatz.

23) Gestufte Formeinsätze können mit einer Stufenhöhe von mehreren 100 µm hergestellt werden.

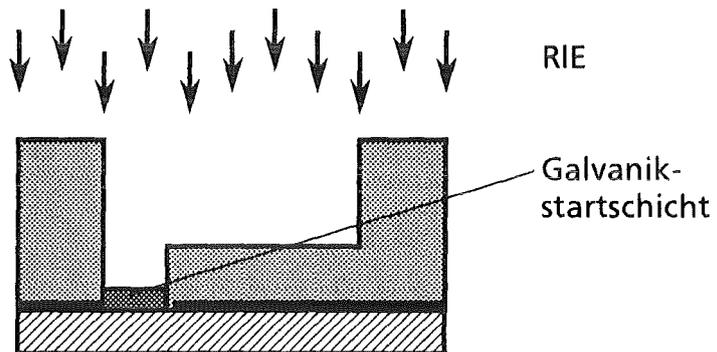
Aufbringen der
Haftschicht und
des Formstoffes



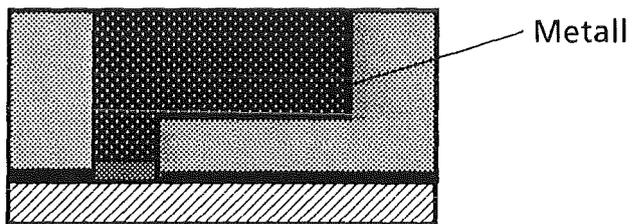
Strukturierung des
Formstoffes durch
justiertes Prägen
mit einem gestuften
Formeinsatz



Freiätzen der
Galvanikstartschicht



Aufgalvanisieren
der Mikrostrukturen
aus Metall



Auflösung von
Haftschicht und
Formstoff,
Vereinzelung
der Chips

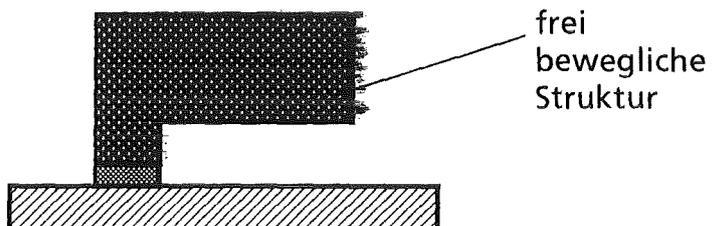


Abb. 5.1: Herstellung von schwingungsfähigen Mikrostrukturen durch Abformung mit einem gestuften Formeinsatz, Freiätzen der Galvanikstartschicht und Galvanoformung.

Durch Abformung von beweglichen und gestuften Mikrostrukturen ergeben sich für die Herstellung von Sensoren und Aktoren völlig neue Möglichkeiten. Hierbei ist beim LIGA-Verfahren besonders die Kombination der geringen Fertigungstoleranzen einzelner Mikrostrukturen und ganzer Baugruppen mit der Möglichkeit zur Massenfertigung interessant. Durch die hohe Präzision, die geringen Abmessungen und die damit verbundenen geringen Massen können bewegliche Mikrostrukturen mit extrem kurzen Ansprechzeiten hergestellt werden.

Mit der Lösung der hier aufgezeigten Probleme ergibt sich durch die Integration von mikromechanischen Bauteilen auf mikroelektronischen Schaltungen ein Weg zur kostengünstigen Herstellung von Mikrosystemen in großen Stückzahlen.

Litaraturverzeichnis:

- /1/ W. Menz:
Microactuators in LIGA Technique,
Proceedings of the 3rd International ISEM Symposium on the Application of
Electromagnetic Forces, Sendai, Japan, 28-30 January 1991; International
Journal of Applied Electromagnetics in Materials 2, 281-284, (1992)
- /2/ W. Menz:
Einführung in die Verfahren der Mikrostrukturierung,
Symposium Mikrosystemtechnik,
FH Regensburg, 17-23, (1991)
- /3/ A. Heuberger (Hrsg.):
Mikromechanik,
Springer-Verlag, Berlin (u.a.), (1989)
- /4/ W. Kroy, M. Königer, H. Zinner:
Einführung in die Mikrosystemtechnik
Symposium Mikrosystemtechnik,
FH Regensburg, 7-13, (1991)
- /5/ W. Menz, P. Bley:
Anwendung der LIGA-Technik für Sensoren in Mikrosystemen,
Technologietrends in der Sensorik und ihre industrielle Umsetzung
VDI/VDE-TZ, Berlin, (1991)
- /6/ KfK-Nachrichten 23, Nr. 2-3
P. Bley, W. Menz:
Stand und Entwicklungsziele des LIGA-Verfahrens zur Herstellung von
Mikrostrukturen, Seite 69.
W. Bacher, P. Bley, H. Hein, U. Klein, J. Mohr, W.K.Schomburg, R. Schwarz,
W. Stark:
Herstellung von Röntgenmasken für das LIGA-Verfahren. Seite 76.
J. Mohr, J. Göttert, C. Müller, P. Bley:
Anwendung des LIGA-Verfahrens zur Herstellung von geometrisch und
integriert optischen Komponenten, Seite 93.
J. Mohr, P. Bley, C. Burbaum, U. Wallrabe:
Herstellung von beweglichen Mikrostrukturen mit dem LIGA-Verfahren,
Seite 110.
W. Bacher, K. Feit, M. Harmening, A. Michel, W. Stark, J. Stölting:
Herstellung von Mikrostrukturen nach dem LIGA-Verfahren durch
Galvanoformung und Kunststoffabformung, Seite 84.
R. Ruprecht, W. Bacher, P. Bley, M. Harmening, W. Schomburg:
Herstellung von Infrarotfiltern für das Weltraumobservatorium ISO mit
Hilfe des LIGA-Verfahrens, Seite 118.
Kernforschungszentrum Karlsruhe, (1991)

- /7/ J. Mohr, W. Ehrfeld, D. Münchmeyer:
Analyse der Defektursachen und der Genauigkeit der Strukturübertragung
bei der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung,
KfK Bericht 4414, Kernforschungszentrum Karlsruhe, (1988)

- /8/ J. Göttert, J. Mohr, C. Müller:
Examples and Potential Applications of LIGA Components in Microoptics
Workshop, Integrierte und Mikrooptik mit Polymeren,
Mainz, (1992)

- /9/ M. Harmening, W. Bacher, P. Bley, A. El-Kholi, H. Kalb, B. Kowanz, W. Menz,
A. Michel, J. Mohr:
Molding of Threedimensional Microstructures by the LIGA Process,
MEMS '92, Travemünde, 202-207, Germany (1992)

- /10/ U. Wallrabe, P. Bley, B. Krevet, W. Menz, J. Mohr:
Theoretical and Experimental Results of an Electrostatic Micro Motor with
Large Gear Ratio Fabricated by the LIGA Process,
MEMS '92, Travemünde, 139-140, Germany (1992).

- /11/ U. Wallrabe, M. Himmelhaus, J. Mohr, P. Bley, W. Menz:
Rotierende Mikrostrukturen als Grundlage für einen mikromechanischen
Strömungsmesser;
Werkstoffe der Mikrotechnik-Basis für neue Produkte-,
VDI/VDE Gesellschaft Feinwerktechnik, 327-337, Karlsruhe (1991).

- /12/ J. Mohr, P. Bley, M. Strohrmann, U. Wallrabe:
Microactuators Fabricated by the LIGA Process
Actuator '92, 3rd Int. Conference on New Actuators, Bremen, 19-23, (1992)

- /13/ C. Burbaum, J. Mohr:
Herstellung von mikromechanischen Beschleunigungssensoren in LIGA-
Technik,
KfK-Bericht 4859, Kernforschungszentrum Karlsruhe, (1991)

- /14/ R. Ruprecht, W. Bacher:
Herstellung von Infrarotfiltern für Anwendungen in der Weltraumfor-
schung durch Röntgentiefenlithographie und Mikrogalvanoformung,
DGO-Jahrestagung, 531-534, Königswinter, (1991)

- /15/ B. Kowanz, W. Ehrfeld:
Systemtechnische Analyse und Entwicklung eines Mikroventils in LIGA-
Technik,
KfK-Bericht 4886, Kernforschungszentrum Karlsruhe, (1991)

- /16/ W. Menz, W. Bacher, M. Harmening, A. Michel:
The LIGA-Technique - a Novel Concept for Microstructures and the
Combination with Si-Technologies by Injection Molding.
Micro Electro Mechanical Systems, Nara, Japan, 30.01. - 02.02.1991
Proc. IEEE, Cat. Nr. CH2957-9/91/0000-0069, 69-73, (1991)
- /17/ H. Vollmer, W. Ehrfeld, P. Hagmann:
Untersuchungen zur Herstellung von galvanisierbaren Mikrostrukturen mit
extremer Strukturhöhe durch Abformung mit Kunststoff im Vakuum-
Reaktionsgießverfahren.
KfK-Bericht 4267, Kernforschungszentrum Karlsruhe, (1987)
- /18/ M. Harmening, W. Ehrfeld:
Untersuchung zur Abformung von galvanisierbaren Mikrostrukturen mit
großer Strukturhöhe aus elektrisch isolierenden und leitfähigen
Kunststoffen.
KfK-Bericht 4711, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1990)
- /19/ F. Esser:
Polymethacrylate,
Verlag Carl Hanser, München, (1975)
- /20/ G. Habenicht (Hrsg.):
Kleben - Grundlagen, Technologie, Anwendung,
Springer-Verlag, Berlin (u.a.), (1991)
- /21/ H. Czichos (Hrsg.):
Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften, 29. Auflage,
Springer-Verlag, Berlin (u.a.), (1989)
- /22/ H. Batzer:
Polymere Werkstoffe,
Verlag Georg Thieme, Stuttgart, (1984)
- /23/ H. Domininghaus:
Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, 3.Auflage,
VDI-Verlag, Düsseldorf, (1988)
- /24/ F.R. Schwarzl:
Polymermechanik,
Springer-Verlag, Berlin (u.a.), (1990)
- /25/ W.F. Hemminger, H.K. Cammenga:
Methoden der Thermischen Analyse,
Springer-Verlag, Berlin (u.a.), (1989)
- /26/ J. Zierrep:
Grundzüge der Strömungslehre,
Verlag G. Braun, Karlsruhe, (1982)

- /27/ Y.S. Touloukian, R.K. Kirby, R.E. Taylor, P.D. Desai, eds.:
Therophysical Properties of Matter,
TPRC Data Series, vol. 12, 225, (1975)
- /28/ R. Fritz, H. Dingreiter, M. Harmening:
Optimierung des spanenden Bearbeitungsverfahrens für Mikrostrukturen
aus Nickel
Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, (1991)
- /29/ W. Bacher, R. Ruprecht, A. Michaelis, J.W. Schultze, A. Thies:
Metallabscheidung auf Substraten für Mikrogalvanik
Dechema-Monographien Band 125, VCH Verlagsgesellschaft (1992)
- /30/ A. Michel et. al.:
KfK-IMT, (1992), unveröffentlicht
- /31/ Polymer Laboratories:
DMTA Mk II, Handbuch,
Loughborough, England, (1990)
- /32/ W.-M. Kulicke:
Fließverhalten von Stoffen und Stoffgemischen,
Verlag Hüthig & Wepf, Basel, (1986)
- /33/ K. Lauth, M. Harmening:
Realisierung eines Meßwerterfassungssystems zur Prozeßanalyse der
Mikrostrukturabformung mit Kunststoffen,
Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, (1991)
- /34/ Instron International Limited:
Handbuch Nr. M10-4500-5,
Instron Deutschland, Offenbach, (1990)
- /35/ A. Michel et. al.:
KfK-IMT, (1992), unveröffentlicht
- /36/ S. Harsch, W. Ehrfeld, A. Maner:
Untersuchungen zur Herstellung von Mikrostrukturen großer Strukturhöhe
durch Galvanoformung in Nickelsulfamatelektrolyten,
KfK-Bericht 4455, Kernforschungszentrum Karlsruhe, (1988)
- /37/ A. Maner, W. Ehrfeld:
Electroforming Techniques in the LIGA Process for the Production of
Microdevices
Materials & Manufacturing Processes, 4 (4), 527 - 537, (1989)

Anhang

Aufschumpfen von Mikrostrukturen

Analog zu dem in Abschnitt 2.3 beschriebenen Freischumpfen können Mikrostrukturen mit anderen Geometrien beim Abkühlen auf den Formeinsatz aufschumpfen. Durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Formstoff und Formeinsatz schrumpft eine Mikrostruktur aus Formstoff beim Abkühlen auf die von ihr umschlossene Mikrostruktur des Formeinsatzes auf.

Am Beispiel einer Hohlzylinder-Mikrostruktur aus Formstoff, die auf den Innenzylinder des Formeinsatzes aufschumpft, werden die Spannungen in der Mikrostruktur in Abhängigkeit vom Innen- und Außendurchmesser sowie der Temperaturdifferenz bestimmt.

Die Berechnung wurde unter folgenden Voraussetzungen durchgeführt:

- Formeinsatz und Substrat haben etwa den gleichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, so daß bei der Abkühlung keine Aufschumpfung der Mikrostrukturen zum Flächenschwerpunkt des Formeinsatzes stattfindet.
- Vollständiges Freischumpfen des Hohlzylinderaußendurchmessers vom Formeinsatz.
- Die Rauigkeit der senkrechten Mikrostrukturwände kann für die Rechnung vernachlässigt werden.
- Die Berechnung der Spannungen findet erst unterhalb der Versprödungstemperatur statt. Ab dieser Temperatur kann das Deformationsverhalten des Formstoffes (mit hinreichender Genauigkeit) als rein elastisch angesehen werden. Bei der Abkühlung bis zur Versprödungstemperatur schrumpfen die Mikrostrukturen bereits auf den Formeinsatz auf. Die beim Prägen und durch das Aufschumpfen in den Mikrostrukturen erzeugte Druckspannung ($\sigma_{D,0}$) wird oberhalb der Versprödungstemperatur durch Spannungsrelaxation teilweise abgebaut.

Aus Gleichung 2.17 für die thermische Ausdehnung ($\epsilon = \alpha * \Delta T$) ergibt sich die Differenz der Durchmesser, um die sich bei der Abkühlung der Innendurchmesser des Hohlzylinders (Mikrostruktur, Index MS) mehr als der Außendurchmesser des Zylinders (Formeinsatz, Index F) zusammenziehen würde. Diese thermisch bedingte Dehnung $\Delta d/d$ führt zu einer elastischen Verformung des Hohlzylinders, die mit einer Druckspannung σ_D verbundenen ist.

$$\Delta d / d = \Delta \alpha * \Delta T \quad (A.1)$$

Nach dem Hookschen Gesetz für den zweiachsigen Spannungszustand gilt für die Dehnung der Innenfaser des Hohlzylinders $\varepsilon_{MS} / 21/$

$$\varepsilon_{MS} = \sigma_D * K_{MS} \quad (A.2)$$

$$\text{mit } K_{MS} = ((1 + d_i^2/d_a^2)/(1 - d_i^2/d_a^2) + \nu_{MS}) / E_{MS}$$

und die Dehnung der Außenfaser des Zylinders ε_F

$$\varepsilon_F = \sigma_D * K_F \quad \text{mit } K_F = (1 - \nu_F) / E_F \quad (A.3)$$

Hierbei sind ν_{MS} und ν_F die Querkontraktionszahlen des Hohlzylinders bzw. des Zylinders. Der Index "i" bezeichnet den Innendurchmesser und "a" den Außendurchmesser des Hohlzylinders aus Formstoff.

Durch einsetzen in Gleichung A.2 und auflösen nach der Änderung der Druckspannung $\Delta\sigma_D$ ergibt sich:

$$\Delta\sigma_D = \Delta \alpha * \Delta T / (K_{MS} + K_F) \quad (A.4)$$

$$\Delta\sigma_D = k_1 / (k_2 + (d_a^2 + d_i^2) / (d_a^2 - d_i^2))$$

$$\text{mit } k_1 = \Delta \alpha * \Delta T * E_{MS}$$

$$k_2 = E_{MS} / E_F * (1 - \nu_F) + \nu_{MS}$$

Da bei Raumtemperatur der Elastizitätsmodul des Formeinsatzes rund 100mal größer als der Elastizitätsmodul der Mikrostrukturen aus Formstoff ist, kann die elastische Dehnung des Formeinsatzes vernachlässigt werden, so daß $k_2 = \nu_{MS}$ wird. Der Fehler, der sich durch diese Vereinfachung ergibt liegt unter 1%. Die Druckspannung im Innendurchmesser der Mikrostruktur ergibt sich aus der Druckspannung bei der Versprödungstemperatur $\sigma_{D,0}$ und der temperaturbedingten Änderung der Druckspannung.

$$\sigma_D = \sigma_{D,0} + \Delta \alpha * \Delta T * E_{MS} / (\nu_{MS} + (d_a^2 + d_i^2) / (d_a^2 - d_i^2)) \quad (A.5)$$

Im Gegensatz zu Kap. 2.4 ist $\Delta \alpha = (\alpha_F - \alpha_{MS}) < 0$, so daß die Druckspannung in den Mikrostrukturen und damit die Entformkraft mit abnehmender Temperatur zunimmt.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines vom Kernforschungszentrum Karlsruhe gewährten Doktorandenstipendiums und wurde am Institut für Mikrostrukturtechnik der Universität und des Kernforschungszentrums Karlsruhe durchgeführt.

Wir bedanken uns bei allen Mitarbeitern des Instituts für Mikrostrukturtechnik, insbesondere bei denen aus den Abteilungen Physikalische Prozeßtechnik und Lithographie, der Gruppe Mikrogalvanoformung, der Werkstatt und des Elektrolabors für die gute und erfolgreiche Zusammenarbeit.